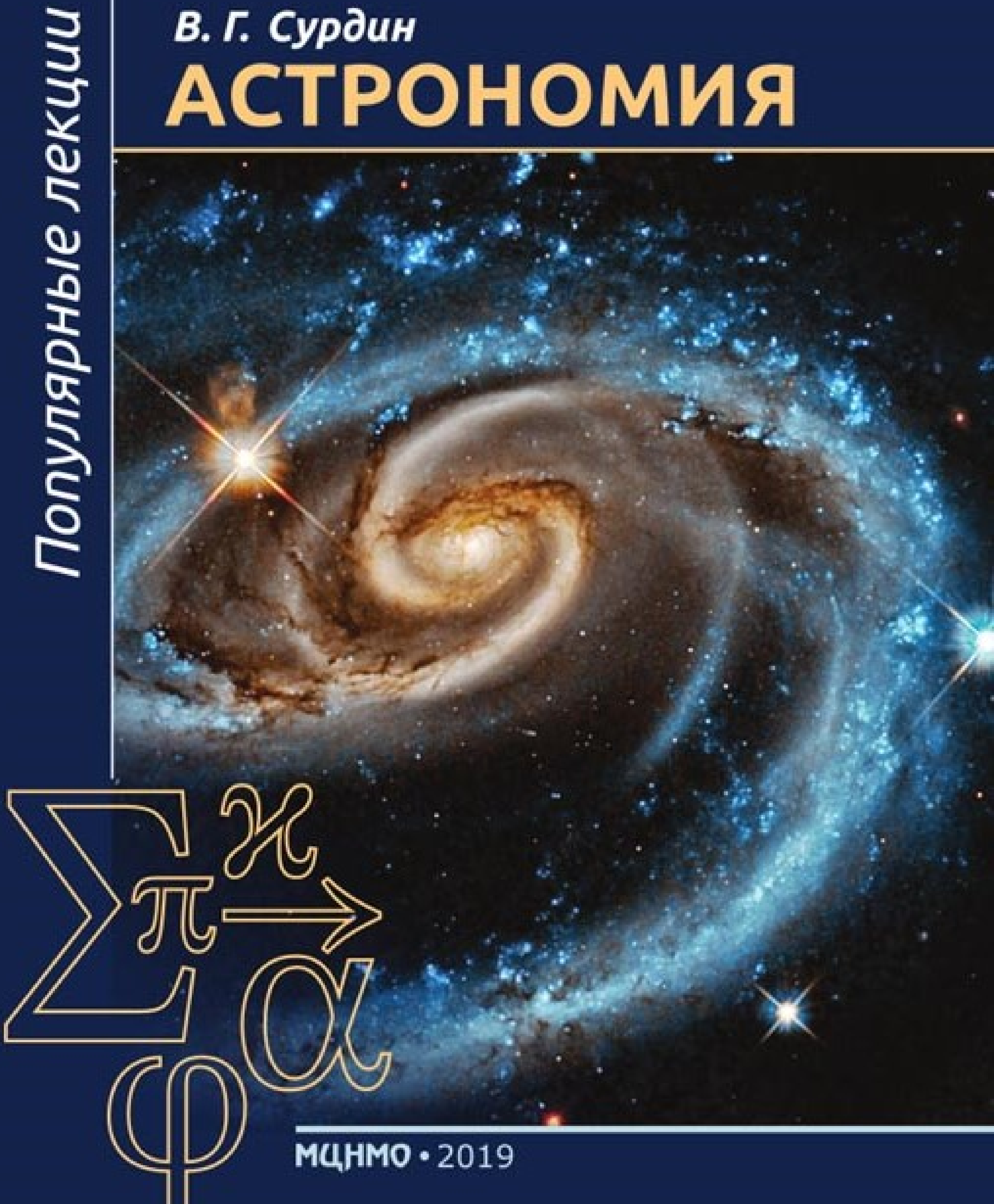
Популярные лекции

В. Г. Сурдин

# АСТРОНОМИЯ



МЦНМО • 2019

**Сурдин. Астрономия Лекции**






Мы от всего сердца благодарим всех, кто помог освободить лучшие научно-популярные книги из оков рынка! Наша особая благодарность — тем, кто сделал самые значительные пожертвования (имена указаны в порядке поступления вкладов):

Дмитрий Зимин
Екатерина Васильева
Зинаида Стаина
Иван Пономарев
Александр Боев
Николай Кочкин
Сергей Вязьмин
Сергей Попов
Алина Федосова
Роберт Имангулов
Алексей Волков
Анонимный жертвователь
Кирилл Крохмалев
Руслан Кундельский
Андрей Савченко
Владимир Валентинасов
Павел Дорожкин
Евгений Шевелев

Павел Мерзляков
Александра Прутова
Лада Сычева
Максим Кузьмич
Анастасия Коростелева

Мы также от имени всех читателей благодарим за финансовую и организационную помощь:

Негосударственный институт развития «Иннопрактика»

Российскую государственную библиотеку

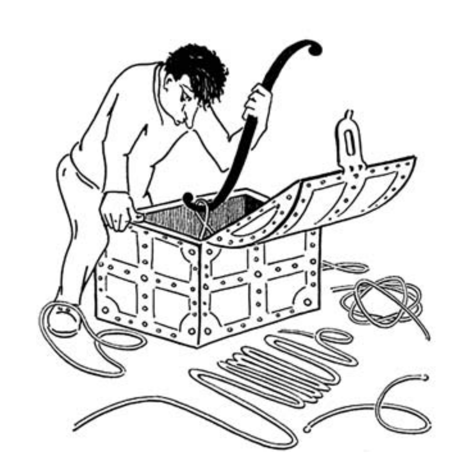
Компанию «Яндекс»

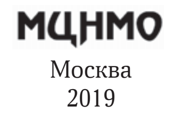
Фонд поддержки культурных и образовательных проектов «Русский глобус».

В. Г. Сурдин

# Астрономия

## *Популярные лекции*






Москва
2019

УДК 52(15)
ББК 22.6
С90

**Сурдин В. Г.**

С90 Астрономия. Популярные лекции. — Изд. 2-е, расширенное. — М.: Издательство МЦНМО, 2019. — 352 с.
ISBN 978-5-4439-2823-4

В книге представлены развернутые и отредактированные записи лекций, прочитанных в последние годы студентам различных специальностей. Базой для них стал межфакультетский курс МГУ «Основы астрономии». Эти лекции можно использовать как вводный курс для студентов естественно-научных факультетов (физиков, химиков, биологов, географов и геологов), а также математиков и инженеров, которые ранее систематически не изучали астрономию, но в своей работе могут с ней соприкоснуться. Лекции будут небесполезны и для филологов, особенно для переводчиков и редакторов, поскольку знакомят с современной астрономической терминологией и важнейшими понятиями из области космических наук. Предыдущее издание книги вышло в 2018 г. В настоящее издание добавлены две главы: о планетах-гигантах и малых телах Солнечной системы.

УДК 52(15)
ББК 22.6

*На обложке:* галактика UGC 1810, существенно «омолодившаяся» в результате взаимодействия с небольшой соседней галактикой. Фото космического телескопа «Хаббл» (NASA).

*На переднем форзаце:* Двойное звездное скопление в созвездии Персей (фото Roth Ritter).

*На заднем форзаце:* область звездообразования S106. Credit: NASA, ESA, Hubble Legacy Archive.

В оформлении титульного листа использован рисунок д-ра физ.-мат. наук И. В. Новожилова.




ISBN 978-5-4439-2823-4 

# Предисловие

Днем, при солнечном свете, мы видим
только Землю. Ночью мы видим весь мир.
*Владимир Клавдиевич Арсеньев,*
*путешественник, географ, писатель*

В 1932 г. астрономия вошла в школьную программу как самостоятельный предмет — 1 час в неделю в 7 классе и 2 часа в неделю в 9 классе. С 1935 г. она преподавалась в 10 классе в объеме 72 часа. В 1936 г. произошло слияние астрономии с физикой. С 1937 г. астрономия снова стала самостоятельным предметом, но ее объем уменьшился до 36 часов. С 1993 г. астрономия начала исчезать из школьной программы. Ее преподавание сохранилось в качестве предмета по выбору и факультатива, т. е. осталось лишь в элитарных школах. Поэтому и без того смутное представление у молодежи об окружающем мире стало все сильнее вытесняться мифами и околонаучными сенсациями. Но в силу естественной любознательности школьники и студенты тянутся к знаниям о космосе, а руководители просвещения понимают необходимость этих знаний для будущих ученых и инженеров. Вот почему за последние несколько лет наиболее сильные университеты России ввели в программу физических факультетов базовые курсы астрономии, а МГУ им. М. В. Ломоносова даже организовал межфакультетский и дистанционный курсы основ астрономии. Наконец, с 1 сентября 2017 г. астрономия вернулась в школьную программу как обязательный предмет для 10 или 11 классов.

За те годы, что астрономия систематически преподавалась у нас лишь немногочисленным будущим специалистам небесной науки, многое изменилось. Интернет сделал знания общедоступными, и он же породил «клиповый» формат сообщений. Теперь от учебного курса для широкой аудитории требуется не систематическое изложение полного объема информации по предмету, а демонстрация его связи с другими науками и областями жизни, разъяснение «тонких мест»,

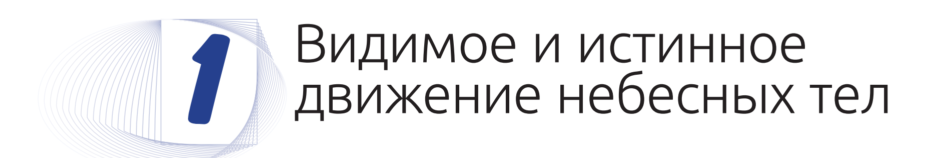
исправление аберраций, рожденных непрофессиональными сообщениями в Интернете. И главное, что требуется от лектора, — зажечь интерес к предмету и желание черпать дополнительные знания из окружающих потоков информации. Чтобы добиться этого, нужно испытать разные подходы; один из них — перед вами.

Эта книга подготовлена на основе лекций, прочитанных в 2013–2018 гг. в МГУ им. М. В. Ломоносова и в его бакинском филиале, на физическом факультете Новосибирского государственного университета, на online-курсах порталов «Лекториум» и «Открытое образование» и в некоторых публичных лекториях, клубах и средних школах России. Частично материалом для нее послужил курс «Общая астрономия», который я читаю на астрономическом отделении физического факультета МГУ. Каждый из упомянутых курсов сопровождался богато иллюстрированными презентациями. Продемонстрировать их все на страницах книги невозможно, но вы можете выйти на них через мою страницу в Интернете: http://lnfm1.sai.msu.ru/~surdin. Там же есть ссылки на книги, видеолекции и online-курсы.

Первое издание книги встретило благосклонное внимание читателей, и тираж был весьма быстро распродан. Вероятно, этому способствовало то, что астрономия вновь, после двух десятилетий забвения, стала обязательным школьным предметом. Поэтому я готовил книгу как раз для того, чтобы дать в руки учителю и любознательному ученику современные и неформальные знания о Вселенной. В новом издании исправлены ошибки и опечатки первого; их список поддерживается на интернет-странице http://lnfm1.sai.msu.ru/~surdin/Astro_pop-lect_proof.htm. Кроме того, добавлены две главы: о планетах-гигантах, их спутниках и кольцах, а также о планетах-карликах и малых телах Солнечной системы — астероидах и кометах. Надеюсь, эта книга сделает более интересным, увлекательным и полезным регулярный курс астрономии.

Многие иллюстрации для лекций и книги были взяты с открытых сайтов NASA, ESA, ESO и других научных организаций, за что я им глубоко благодарен. Среди моих коллег и друзей, своей работой способствовавших подготовке этих лекций, я отдельно хочу поблагодарить С. И. Блинникова и С. А. Ламзина, а также особо отметить профессора Санкт-Петербургского университета Константина Владиславовича Холшевникова, внимательно прочитавшего часть текста и сделавшего ряд важных замечаний. А тем фактом, что книгу приятно держать в руках, мы обязаны автору макета и многих рисунков Н. Л. Васильевой.

*В. Г. Сурдин, июль 2018 г.*



# 1 Видимое и истинное движение небесных тел

Сначала мы обсудим видимые движения небесных тел, в том числе приводящие к солнечным и лунным затмениям. Говоря о видимом движении светил, мы имеем в виду изменение их взаимного положения на небесной сфере, не включая сюда кажущееся вращение самой небесной сферы, обусловленное суточным вращением Земли.

## Фазы и либрации Луны

Самое привычное и наглядное из видимых изменений на небе — это смена фаз Луны. Мы с детства знаем, что образ Луны ежемесячно проходит через несколько характерных фаз: новолуние, первую четверть, полнолуние и последнюю четверть. Однако указать причину этого привычного явления может далеко не каждый. На днях моей маленькой внучке подарили книгу, от чтения которой у меня волосы встали дыбом, поскольку ее автор представил смену лунных фаз как ежемесячное затмение лунного диска тенью Земли. Ежемесячное лунное затмение — такого наивного представления об астрономических событиях я еще не встречал и даже не ожидал его от



**Рис. 1.1.** Полнолуние (слева) и первая четверть.

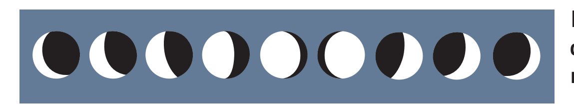


**Рис. 1.2.** **Так происходит смена фаз Луны. В Северном полушарии — справа налево.**

современного человека. Поэтому, думаю, с причиной смены лунных фаз нужно познакомиться в первую очередь.

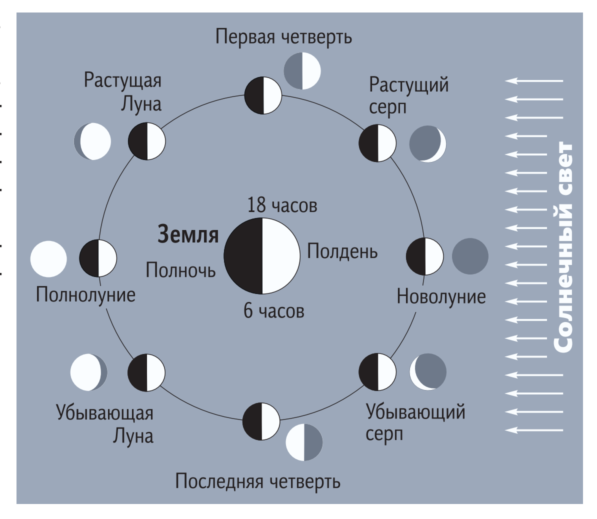
При описании внешнего вида Луны или планеты мы называем фазой определенную стадию в периодическом изменении видимой формы освещенного Солнцем полушария этих тел. Солнце всегда освещает одно полушарие небесного тела, а фаза — это понятие, связанное с наблюдателем. Фаза измеряется тем, какую часть освещенного Солнцем полушария видит наблюдатель. Смена фаз Луны — явление наглядное. Каждый следующий день мы наблюдаем этот спутник Земли в новом виде. В течение 29,5 суток, практически одного месяца, происходит полная смена фаз — проходит так называемый синодический лунный месяц.

Мы находимся на Земле, Луна движется вокруг нас, совершая за месяц полный оборот. Солнце в этой шкале времени почти неподвижно (за месяц смещение Солнца относительно Земли происходит всего лишь на $^1/_{12}$ часть окружности). У лунного шара всегда освещено полушарие, обращенное к Солнцу, а мы наблюдаем лунный шар с разных сторон по отношению к направлению на Солнце, поэтому иногда видим его полностью освещенную половинку, иногда — часть, а иногда (в новолуние) к нам обращена полностью затемненная сторона лунного шара. Это и есть причина смены фаз. То есть у Луны всегда освещена одна половина и всегда в тени другая, но наша точка зрения на эти половинки в течение месяца меняется.

Тем не менее, хотя в течение месяца мы видим и светлую, и темную стороны Луны, из этого не следует, что с Земли мы можем увидеть всю лунную поверхность: к Земле постоянно обращена одна — «видимая» — сторона Луны. Почему так происходит? А потому, что два движения Луны синхронны: один оборот по орбите вокруг Земли и один поворот вокруг своей оси Луна совершает за одно и то же время — за месяц.

Названия фаз Луны на русском языке не очень разнообразны, их в ходу четыре: *новолуние*, *первая четверть*, *полнолуние* и *последняя четверть*. Кстати, вы не задумывались, почему мы говорим «четверть», когда освещена половина лунного диска? А потому, что от новолуния прошла четвертая часть периода — лунного месяца.

**Рис. 1.3.** **Фазы Луны. Показано ее движение по орбите вокруг Земли. Вид со стороны Северного полюса. Луна движется против часовой стрелки. Рядом с орбитой показан внешний вид Луны для земного наблюдателя в Северном полушарии в соответствующие моменты синодического месяца.**




В некоторых других языках существуют более разнообразные варианты названий лунных фаз. Например, в английском между новолунием и первой четвертью выделяют фазу «растущего серпа» (*waxing crescent*), а между первой четвертью и полнолунием еще есть «растущая луна», или «растущий месяц» (*waxing gibbous*). Соответствующие фазы после полнолуния называются «убывающая луна» (*waning gibbous*) и «убывающий серп» (*waning crescent*). Думаю, у некоторых коренных народов, для которых Луна и ее ночной свет гораздо важнее, чем для нас, городских жителей, есть и другие названия лунных фаз, которые дробят месяц на более мелкие периоды. Например, у эскимосов есть два десятка слов для характеристики цвета и состояния снега, потому что для них он очень актуален. Так и с Луной, вероятно.

В английском языке есть выражение «on the dark side of the Moon», есть и такая песня. Но это выражение неверно, поскольку в нем подразумевается, что сторона Луны, о которой поет Pink Floyd, всегда темная, а обращенная к нам — всегда светлая. Правильно было бы говорить «on the far side of the Moon» — «на дальней стороне Луны». А ближнюю к Земле называют «near side», поскольку на Землю смотрит всегда одно и то же полушарие, а другое всегда от нас отвернуто, и до полетов космических аппаратов мы никогда не видели дальнюю сторону. Впрочем, знатоки английского языка говорят, что у слова *dark* есть и другие значения — «скрытый, невидимый». В таком случае выражение «on the dark side of the Moon» можно было бы оправдать. Но во избежание недоразумений астрономы предпочи-

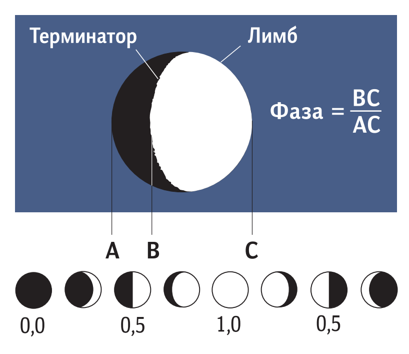



**Рис. 1.4.** Фаза Луны или планеты выражается числом $F = d/D$, где $d$ — ширина освещенной части, а $D$ — диаметр диска.

тают называть видимую и невидимую с Земли стороны Луны «near side» и «far side».

Численным значением фазы называют освещенную долю диаметра диска Луны (или планеты), перпендикулярного линии, соединяющей концы серпа, или, что то же самое, — отношение площади освещенной части видимого диска ко всей его площади. Следовательно, фаза определяется числом от 0 до 1 — отношением максимального размера освещенной части диска к полному диаметру диска. Но из-за того, что фаза 0,5 соответствует и первой, и последней четверти, без дополнительного указания трудно разобраться, о какой именно фазе идет речь, — тут у астрономов недоработка. Кто любит математику, докажет простую теорему о том, что отношение $d/D$ равно отношению освещенной площади диска к его полной площади.

Граница между освещенной и неосвещенной частями диска называется *терминатором*, и у шарообразного небесного тела она имеет форму половины эллипса, «разрезанного» вдоль большой оси.

Луна движется вокруг Земли по эллиптической орбите, причем заметить это довольно легко, просто измеряя видимый диаметр лунного диска. В течение месяца он меняется: когда Луна к нам ближе (ближайшая к Земле точка орбиты называется *перигеем*), лунный диск выглядит немного крупнее обычного, а когда она дальше всего, в *апогее,* — немного меньше. Впрочем, непрофессиональный глаз мо-

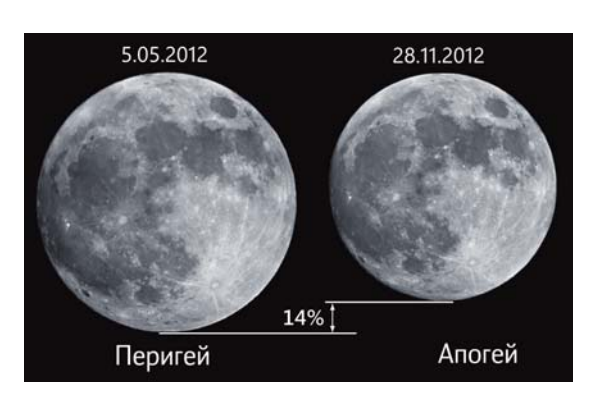



**Рис. 1.5.** Луна на минимальном и максимальном расстояниях от Земли.



**Рис. 1.6.** **Либрации Луны по долготе и широте. Их можно заметить, обратив внимание на кратеры и моря вблизи лимба (края) лунного диска. Кроме этого, заметно меняется и угловой размер диска Луны.**

жет этого и не заметить, поскольку максимальная разница составляет около 14%. Разумеется, эта разница бросается в глаза, когда смотришь на помещенные рядом снимки Луны в апогее и перигее (рис. 1.5). Но при взглядах на небо с интервалом в две недели эта разница совершенно незаметна. Однако в последние годы журналисты регулярно напоминают нам о «суперлунии», утверждая, что Луна будет огромная. Не думаю, что сами они способны заметить эту разницу в 14%.

Движение Луны по эллиптической орбите вызывает одно легко наблюдаемое явление, о котором мало кто знает. Я имею в виду либрации, т. е. видимые покачивания лунного шара (от лат. *libratio* раскачивание). В течение аномалистического месяца либрации по долготе достигают почти ±8°. Эти покачивания Луны «вправо-влево» называют либрацией по долготе, а покачивания «с ног на голову» — либрацией по широте. Отдельные моменты этого движения показаны на рис. 1.6. Смена лунных фаз не показана, поскольку это не прямые снимки с Земли, а компьютерная эмуляция на основе теории движения Луны и фотографий ее поверхности, переданных космическим зондом *Clementine* (NASA). В динамике это можно увидеть на странице Википедии https://ru.wikipedia.org/wiki/Либрация. Серия прямых фотографий либраций Луны есть на сайте http://www.pixheaven.net/photo_us? nom=0505-070.

Как объяснить это явление? Оказывается, его природа чисто геометрическая. Причина покачиваний *по долготе* — форма лунной орбиты: ведь она не круговая, а эллиптическая, и это заставляет Луну двигаться вокруг Земли с переменной угловой скоростью. Астрономы называют это вторым законом Кеплера, а физически это простое проявление закона сохранения орбитального момента импульса. В то же время вокруг своей оси Луна, конечно, вращается с постоянной скоростью. Сложение этих двух движений — равномерного и неравномерного — приводит к тому, что Луна иногда показывает

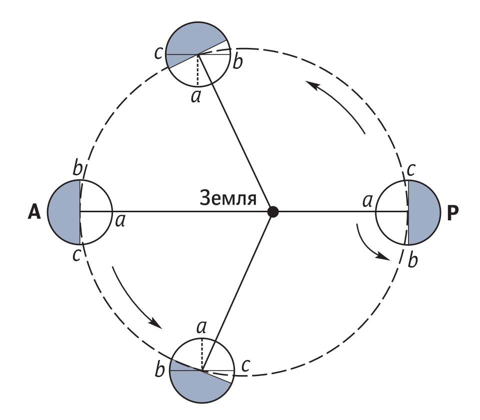



**Рис. 1.7.** **Причина либраций Луны по долготе — в ее неравномерном движении по эллиптической орбите. Точка А — апогей, Р — перигей. Каждый из четырех орбитальных секторов Луна проходит за одно и то же время.**

нам чуть больше своего восточного полушария, а иногда — западного (рис. 1.7). В течение аномалистического месяца либрации по долготе достигают почти ±8°. Эти покачивания довольно легко обнаружить; о них, вероятно, знали еще до изобретения телескопа. *Широтные* покачивания Луны происходят в течение драконического месяца, достигая почти ±7°, из-за того, что ось ее вращения не перпендикулярна плоскости ее орбиты (рис. 1.8). У Земли ось вращения тоже наклонена, поэтому полгода наша планета показывает Солнцу в большей степени одно свое полушарие, вторые полгода — другое. А при наблюдении Луны мы на Земле выступаем «в роли Солнца»: Луна полмесяца показывает нам чуть больше свое северное полушарие, а вторые полмесяца — южное.

Кроме упомянутых выше либраций, вызванных движением Луны по орбите и потому происходящих с периодом в месяц, наблюдается и небольшая суточная либрация, возникающая вследствие близости Луны к Земле. По сути, это эффект суточного параллакса, вызванный движением самóго наблюдателя вместе с поверхностью вращающейся Земли. Наблюдатели, находящиеся в противоположных точках земного экватора, в один и тот же момент видят несколько различные области лунной поверхности. А каждый конкретный наблюдатель в течение ночи перемещается на расстояние порядка радиуса

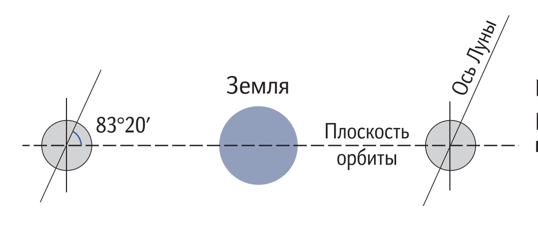



**Рис. 1.8.** **Наклон лунного экватора к орбите (средний — 6°41′, меняется от 6°31′ до 6°51′).**

Земли и поэтому тоже видит Луну с немного различных направлений. С Луны радиус Земли виден под углом 57′; его называют *горизонтальным параллаксом* Луны. Таким образом, суточная либрация Луны может достигать (для жителей экваториальных стран) почти ±1°. Благодаря либрациям всех типов наблюдателю за Земле доступно более половины (около 59%) площади лунного шара.

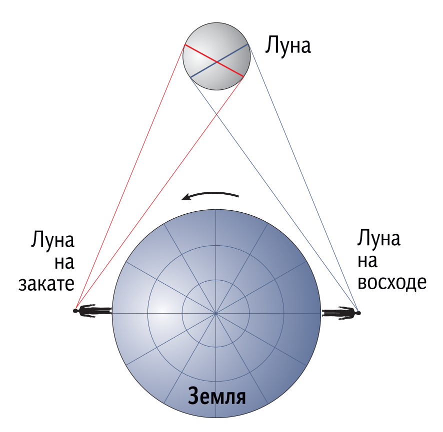



**Рис. 1.9.** Горизонтальный параллакс.

Вообще движение Луны не так-то просто описать математически. В первую очередь оно зависит от притяжения к Солнцу и к нашей планете (см. главу 3, раздел «Траектория Луны»). Учесть притяжение к Солнцу довольно легко, поскольку его форма очень близка к шарообразной: полярный и экваториальный радиусы Солнца различаются лишь на 0,001%. Но о нашей планете этого не скажешь. А поскольку Земля — не шар, а сплюснутый эллипсоид (и это только в первом приближении!), ее гравитационное поле не сферически симметричное, а значительно более сложное. Это вынуждает Луну двигаться по непростой орбите. Если бы ничего, кроме Земли, рядом с Луной не было, проблема была бы не такой сложной; но есть еще Солнце, и оно тоже влияет на движение нашего спутника. А еще на нее действует притяжение больших планет. Так что изучение движения Луны — одна из самых сложных задач небесной механики.

Когда говорят о теории движения Луны, подразумевают некую явную функцию времени — обычно в виде ряда (т. е. суммы) простых функций, — дающую положение и скорость Луны в прошлом и будущем. Уже в начале XX в. аналитическая теория движения Луны содержала 1400 членов. А сегодня, когда методы лазерной локации позволяют измерять расстояние до нашего спутника с ошибкой не более нескольких миллиметров, компьютерные программы движения Луны содержат десятки тысяч членов. Полагаю, что не более сотни из них понятны с точки зрения физики. В первом приближении Земля — шар, имеющий простое гравитационное поле с потенциалом $GM/R$. Во втором приближении Земля — сплюснутый суточ-

ным вращением эллипсоид, и тут мы получаем дополнительные гармоники гравитационного поля. Третье приближение: Земля — трехосный эллипсоид, у которого экватор — не окружность, а эллипс, отчего ситуация еще больше усложняется. К этому мы добавляем значительно более сильное влияние Солнца, а также вполне ощутимое влияние Юпитера, Венеры… Дальше идут члены, смысл которых мы в целом понимаем, но точное их значение выводим лишь путем согласования теории с наблюдениями. Современная теория движения Луны вполне удовлетворяет практические потребности космонавтики и расчета лунных и солнечных затмений, но неисправимая любознательность человека требует всё более высокой точности, поэтому теория до сих пор разрабатывается и уточняется.

### Затмения

Мы, жители Земли, время от времени наблюдаем солнечные и лунные затмения. Нам невероятно повезло, что видимые размеры лунного диска в точности соответствуют размерам солнечного. Это удивительно, потому что Луна, вообще говоря, понемногу удаляется от Земли. Но почему-то именно в нашу эпоху она находится на таком расстоянии от нас, что ее наблюдаемый размер идеально соответствует видимому размеру Солнца. Луна примерно в 400 раз меньше Солнца по физическому размеру, но и в 400 раз ближе к Земле, чем Солнце. Поэтому угловые диаметры их дисков совпадают.

В астрономии есть три разных термина, описывающих ситуацию, когда два объекта в проекции совмещаются на небе. Мы используем тот или иной из этих терминов в зависимости от того, каков относительный угловой размер этих объектов. Если их угловые размеры близки друг к другу, мы называем это *затмением*; если более крупный объект перекрывает собой более мелкий, то это *покрытие*; когда же мелкий объект проходит на фоне крупного — это *прохождение*, или *транзит* (рис. 1.10). Теперь давайте разберемся, чем эти явления могут быть полезны нам, чем они интересны.

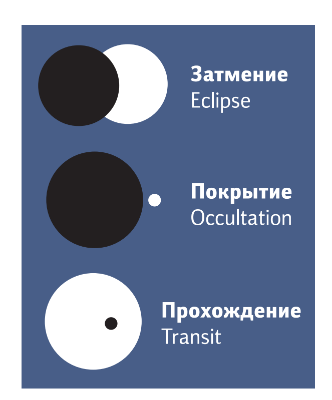



**Рис. 1.10.** **Затмение, покрытие и прохождение. Темный диск ближе к наблюдателю.**

Покрытия — очень удобный способ измерять размер маленьких небесных объектов. Диаметры звезд мы вообще не разли-



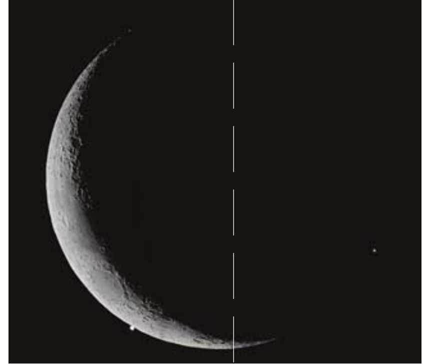


**Рис. 1.11.** ***Слева:*** **покрытие Луной Юпитера (видны спутники Юпитера Ио и Европа).** ***Справа:*** **покрытие Луной Венеры (здесь совмещены два снимка: светлая точка справа, у ночного лимба — Венера перед началом покрытия, точка слева, у дневной части лимба — Венера сразу после окончания покрытия).**

чаем даже в лучшие телескопы: они слишком малы, намного меньше одной угловой секунды. Но если Луна, двигаясь по небу, своим краем закрывает какую-нибудь звездочку, та меркнет, но ее потемнение происходит не моментально, а в соответствии с теорией дифракции: когда источник света закрывают краем плоского экрана, его яркость для удаленного наблюдателя испытывает несколько колебаний и лишь затем окончательно обнуляется. Наблюдая покрытие звезды темным краем лунного диска, можно подобрать теоретическую кривую, подходящую к измеренным колебаниям яркости звезды, и вывести из этого угловой размер объекта. В Государственном астрономическом институте им. П. К. Штернберга (ГАИШ МГУ), где я работаю, мои коллеги этим занимаются и получают при измерении




**Рис. 1.12. Кривая покрытия звезды 61 Тельца темным краем Луны. Получена 2 марта 1982 г. на 0,5-м телескопе в Тянь-Шанской высокогорной экспедиции (ГАИШ МГУ). Угловой диаметр звезды составляет 0,003″. Уровень сигнала после покрытия определяется рассеянным светом Луны.**

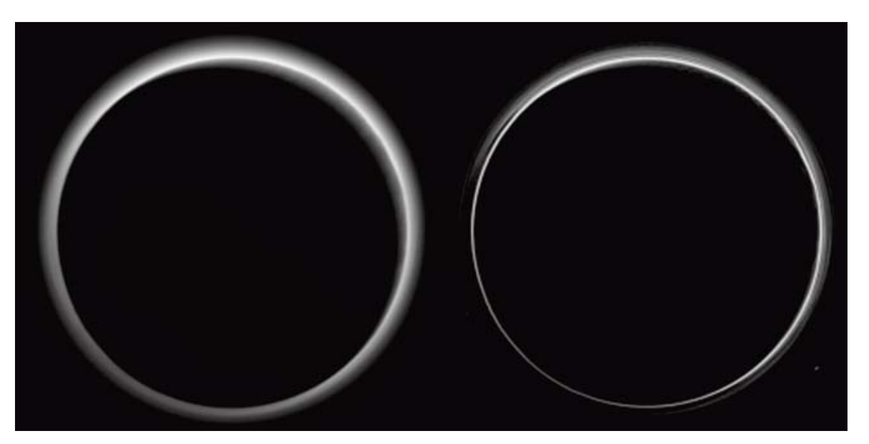


**Рис. 1.13. Атмосфера Плутона. Справа усилен контраст. Фото: «New Horizons».**

размеров звездных дисков разрешение до 0,003 угловой секунды. Это очень высокая точность, которой каким-либо другим способом не достичь. К сожалению, Луна ходит не по всему небу, поэтому измерить размеры всех звезд методом покрытий мы не можем. Луна движется вблизи плоскости эклиптики, примерно в пределах ±5° от нее, и именно в этой полосе угловые размеры звезд хорошо измерены.

В нынешнем веке мы можем не только наблюдать за поведением Земли и Луны, но и видеть затмения-покрытия любых объектов Солнечной системы. Например, в 2015 г. мимо Плутона пролетал первый космический аппарат — «New Horizons» (NASA). Он сфотографировал планету с ночной стороны, и мы впервые увидели атмосферу Плутона. В этом положении диск Плутона закрывает собой Солнце, но солнечные лучи высвечивают по краям планетного диска плутонианскую атмосферу, про свойства которой мы почти ничего не знали. Если повысить контраст, то в атмосфере даже видны слои. И это очень многое говорит нам о том, из чего состоит и как устроена газовая оболочка этой далекой карликовой планеты. Оказалось, что Плутон — маленькая, но очень интересная планета. Недавно в журнале *Nature* появились две статьи, в которых весьма убедительно показано, что под ледяной корой Плутона есть жидкий водный океан. Абсолютно неожиданная вещь! Мы предполагали, что подледный океан есть у спутников Юпитера и Сатурна, но Плутон — он так далеко от Солнца, там так холодно и рядом с ним нет гигантской планеты, которая могла бы его согреть. Там все должно было замерзнуть давно и навсегда. Но оказалось, есть признаки того, что под корой Плутона —

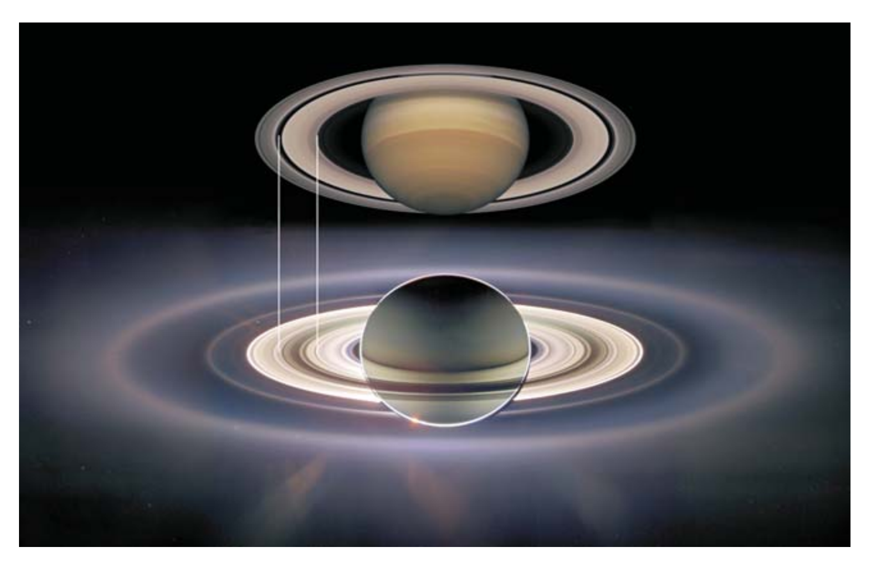


**Рис. 1.14.** ***Вверху:*** **Сатурн в прямом освещении солнечными лучами, каким мы видим его от Земли с помощью космического телескопа «Хаббл» (NASA).** ***Внизу:*** **Сатурн в контровом освещении (т. е. Солнце располагается за диском планеты), сфотографированный зондом «Кассини» (NASA). На нижнем фото контраст и яркость усилены, чтобы лучше были видны внешние кольца G и E. В делении Кассини (темной «щели» между двумя яркими кольцами A и B, видимыми с Земли) и внутри яркого кольца B движутся мелкие и довольно темные частицы, которые плохо отражают свет, но хорошо рассеивают его вперед, поэтому они видны только в контровом освещении и остаются незаметными при наблюдении со стороны Солнца и Земли.**

океан. Он не совсем пригоден для жизни; вероятно, там много аммиака, но все же это океан — и это очень интересно.

А вот еще один замечательный пример — покрытие Солнца Сатурном (рис. 1.14). Обычно мы видим Сатурн так, как в верхней части картинки, когда он вблизи противостояния с Солнцем. Лучи Солнца освещают далекую планету «в лоб», и мы видим ее анфас. Мы давно знали о существовании этого красивого ободка — кольца Сатурна — и всегда думали, что между ним и планетой пустота — ничего нет. Когда первый искусственный спутник Сатурна «Кассини» (NASA) залетел за ночную сторону планеты, мы увидели, что между внутренним краем наблюдаемого с Земли кольца и планетой, напротив, довольно много вещества и что оно тянется до самой атмосферы. То, что это вещество незаметно в отраженном свете, но видно в рассеянном свете при контровом освещении, свидетальствет, что это очень мелкие частицы, размер которых сравним с длиной волны

света. Такие частицы, как известно, плохо отражают свет, но эффективно рассеивают его вперед, по ходу падающего на них излучения, и немного в сторону. Поэтому в отраженном свете они почти не видны, а при контровом освещении отчетливо проявляются.

Пока непонятно, каким образом в кольце происходит сепарация частиц вещества по их размеру и почему мелкие частицы оказались ближе к планете. Простая физическая логика подсказывает, что должно быть наоборот: вблизи границы атмосферы планеты лучше сохраняются крупные частицы, поскольку у них отношение площади сечения к массе меньше, а значит, они слабее тормозятся в верхних слоях атмосферы. В природе же все оказалось не так.

Эту новую информацию о кольцах Сатурна мы получили именно благодаря тому, что использовали ситуацию затмения (покрытия) как прибор для исследования. Контровое освещение выявило много новых деталей в структуре колец.

### *Лунные затмения*

Теперь мы вернемся к лунным и солнечным затмениям. Каждое небесное тело, освещенное Солнцем, отбрасывает сужающийся конус тени и расширяющийся конус полутени. Тень — это область пространства, попадая в которую наблюдатель не видит поверхность

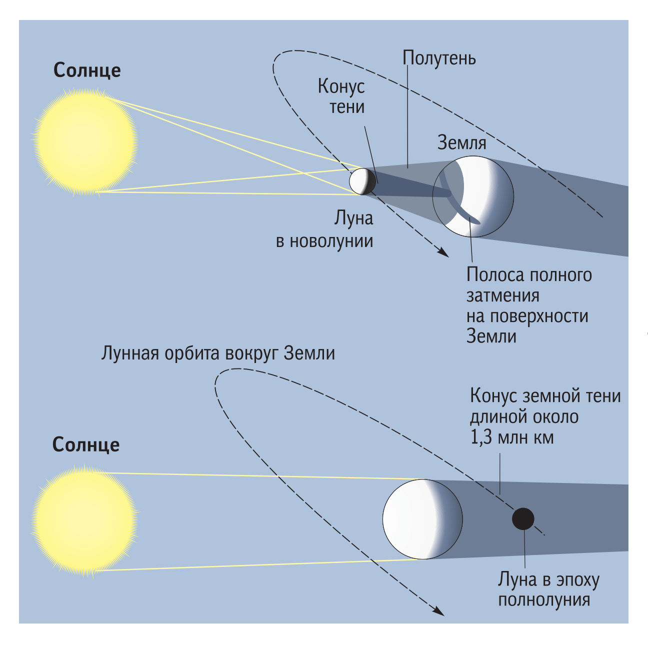



**Рис. 1.15. Схема солнечного и лунного затмений. Принципиальная разница между ними состоит в том, что лунная тень покрывает малую часть земной поверхности, а земная тень полностью скрывает Луну от солнечного света.**

Солнца; в области полутени он видит часть поверхности Солнца. В соответствии с этим лунные затмения делят на теневые и полутеневые. В первом случае хотя бы часть лунного диска проходит через область земной тени, во втором случае — через область полутени. В обоих случаях затмение может быть полным или частным, в зависимости от того, полный диск Луны скрывается в земной тени (полутени) или только его часть. То же и с Солнцем: если наблюдатель попадает в тень Луны, он видит полное солнечное затмение, если в полутень — частное. Полное затмение Солнца не заметить нельзя: днем на несколько минут наступает почти ночная темнота. Но неглубокое частное затмение Солнца, если заранее о нем не знать, вполне можно не заметить. То же и с лунными затмениями: теневое затмение Луны выглядит эффектно, а полутеневое — невзрачно и почти незаметно.

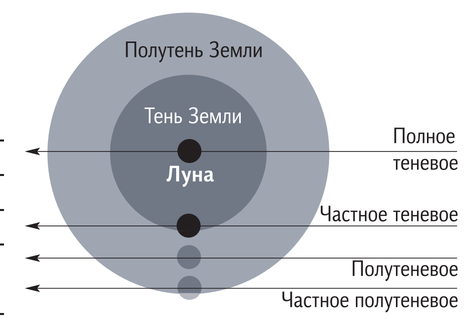



**Рис. 1.16. Лунные затмения.**

Длительность лунного затмения зависит от того, насколько глубоко в земную тень проникает Луна. Самые длительные затмения — центральные, когда Луна проходит через центр земной тени. При этом полное теневое затмение продолжается около 2 часов.

Итак, теневое затмение Луны происходит, когда она попадает в тень, отброшенную Землей. Луна попадала бы туда каждый месяц в момент полнолуния, если бы плоскости лунной и земной орбит совпадали, но они не совпадают. Плоскость орбиты Луны более чем на 5° наклонена к эклиптике (среднее значение этого угла 5,15°, и он колеблется от 4,99° до 5,30°). Центр земной тени лежит на эклиптике, а угловой радиус этой тени для наблюдателя на Земле составляет около 0,7°. Угловой радиус лунного диска — около 0,25°. Следовательно, если Луна удаляется от эклиптики более чем на 1°, она не попа-

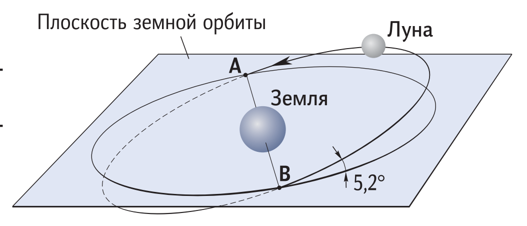



**Рис. 1.17. Взаимное расположение плоскости лунной орбиты и плоскости орбиты Земли. Точки A и B — узлы лунной орбиты.**

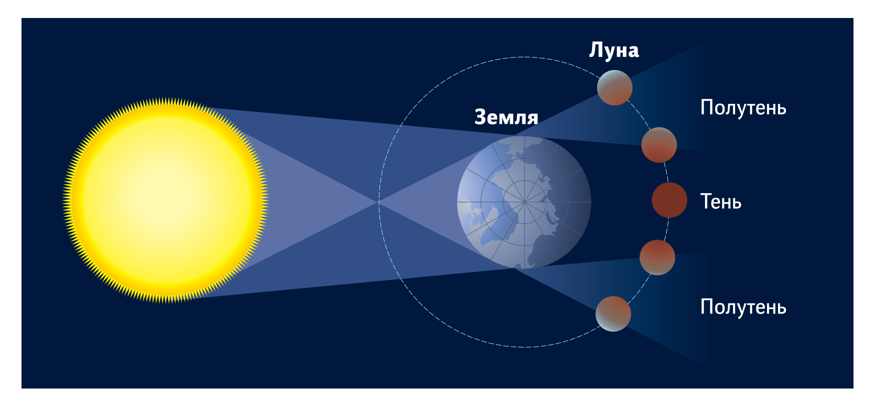



**Рис. 1.18.** Лунное затмение.

дает в тень Земли. Именно поэтому Луна чаще проходит мимо земной тени, нежели попадает в нее.

Затмения как Луны, так и Солнца происходят лишь в те моменты, когда Луна проходит вблизи *узлов* своей орбиты, т. е. пересечений ее орбитальной плоскости с плоскостью эклиптики (в которой всегда находится Солнце). Вблизи узлов Луна проходит дважды в месяц, но для затмения нужно, чтобы в эти же моменты и Солнце тоже оказалось вблизи одного из узлов: если того же узла, где Луна, то наблюдается солнечное затмение, а если противоположного, то лунное. Происходит это не так уж часто: максимальное количество лунных затмений всех типов за год — 4 (например, это произойдет в 2020 и 2038 годах), минимальное — два в год. Солнечные затмения происходят приблизительно с такой же частотой, однако шанс увидеть полное лунное затмение намного выше, чем полное солнечное. Дело в том, что при наличии ясного неба лунное затмение видят все жители ночного полушария Земли, а солнечное — только те жители дневного полушария, кому посчастливилось попасть в узкую полосу, по которой пробегает маленькая (250–270 км) лунная тень.

В процессе полного теневого затмения Луны наш спутник сначала попадает в область полутени и чуть-чуть меркнет, а затем погружается в конус земной тени. Казалось бы, солнечный свет в тень не проникает, других источников света там нет, значит, Луна, пересекая земную тень (а это длится несколько часов), должна стать абсолютно невидимой. Но этого не происходит: она все же немножко видна в темно-багровых тонах. Дело в том, что ее освещают солнечные лучи, рассеявшиеся и преломившиеся в земной атмосфере.

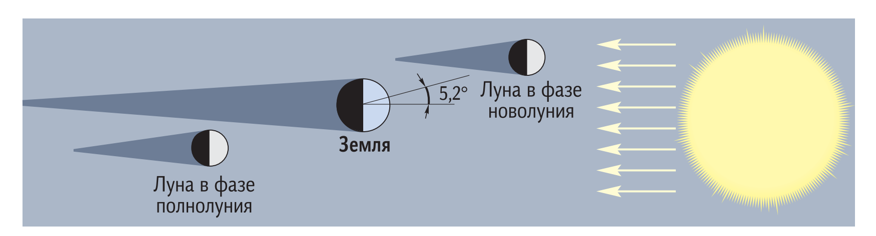



**Рис. 1.19. Солнечные и лунные затмения происходят только в моменты новолуния и полнолуния соответственно. Кроме этого, Луна должна располагаться вблизи узлов своей орбиты, иначе (как на этом рисунке) тени проходят мимо цели.**

Голубая часть их спектра сильно рассеивается в воздухе и поэтому почти не попадает на Луну, а красные лучи рассеиваются в воздухе значительно слабее и, преломившись из-за атмосферной рефракции, направляются в область геометрической земной тени и освещают лунную поверхность.

Поскольку полутеневое затмение Луны заметить глазом почти невозможно — настолько слабо уменьшается яркость лунного диска, — это явление редко привлекает внимание наблюдателей. А вот полные теневые затмения Луны в прошлом активно использовались для науки. Дело в том, что в момент затмения, в середине лунного дня, Солнце на несколько часов резко «выключается» и перестает освещать лунную поверхность, которая начинает понемногу охлаждаться. По тому, как быстро происходит охлаждение лунной поверхности, можно понять, какая у нее структура. Если бы Луна состояла из чистого металла — скажем, была бы плотным алюминиевым шаром, — то ее поверхность остывала бы очень медленно (из-за высокой теплопроводности вещества снизу постоянно подходило бы новое тепло). А если бы Луна была сделана из пемзы или синтепона, теплопроводность которых почти нулевая, температура поверхности падала бы быстро. Наблюдения показали, что в ходе затмения поверхность охлаждается быстро. Следовательно, она скорее «из пемзы или поролона», чем «из меди или алюминия». А если серьезно, то планетологи с помощью затмений еще до полетов на Луну роботов и людей поняли, что ее минеральная поверхность пористая и покрыта пылеобразным веществом, которое мы называем *реголитом*. Позже туда прилетели роботы и люди и подтвердили, что поверхность действительно покрыта пылью, рыхлой наверху и спекшейся в глубине. Так лунные затмения помогли астронавтам заранее узнать, по какой поверхности им предстоит ходить.

*Солнечные затмения*

Еще более замечательное явление — затмения Солнца. Раньше только они позволяли нам увидеть самую внешнюю область солнечной атмосферы — корону Солнца. Физики испытали настоящий шок, когда в середине XX в. была измерена температура этой обла-



**Рис. 1.20.** **Солнечное затмение 29 марта 2006 г. Северный Кавказ, Кисловодская солнечная станция ГАО РАН. Слева — Эльбрус. Фото: М. Лисаков, А. Юферев, Е. Казаков.**

сти, ибо результаты оказались совершенно неожиданными. Что нам говорит нормальная физика? Что по мере удаления от источника тепла температура газа должна понижаться. Мы видим такие примеры сплошь и рядом. Источник тепла на Земле — ее поверхность, нагретая солнечными лучами, поэтому, поднимаясь на самолете, мы наблюдаем, как окружающий воздух становится всё холоднее; на высоте 10 км температура составляет −50 °С. Всё логично.

Энергия Солнца рождается в его ядре и затем просачивается наружу, а значит, снаружи температура должна быть ниже: действительно, в центре Солнца — около 15 000 000 К, а на поверхности — 6000 К: температура падает. И вдруг в области короны она опять начинает стремительно расти — до 2 млн кельвинов. С какой стати? Где источник энергии? В короне чрезвычайно разреженный газ, никакие ядерные реакции там не происходят. Задача была непростая, и решили ее не сразу. Впрочем, и сейчас еще нельзя сказать, что она решена до конца. Большую роль в исследовании солнечной короны сыграли работы советского астрофизика И. С. Шкловского. А начинал он с наблюдения солнечных затмений.

Структура короны, как видите, напоминает картину расположения железных опилок, рассыпанных над двухполюсным магнитом. Явно видно, что у Солнца есть один магнитный полюс сверху и другой снизу, а по бокам — замкнутые структуры (иногда дипольные, иногда многополюсные).

Благодаря затмениям не только были открыты и исследованы солнечная корона и лежащий под ней более плотный и прохладный слой — хромосфера, но состоялись и другие важные открытия и наблюдения. В 1868 г. в спектре хромосферы обнаружились линии неизвестного в ту пору на Земле химического элемента — им оказался гелий. В спектре короны тоже обнаружились неизвестные линии, которые исследователи поторопились приписать еще одному неизвестному элементу, назвав его коронием. Но это оказались линии железа при крайне высокой степени ионизации, недостижимой в ту пору в лаборатории. В 1918 г. затмение помогло подтвердить один из выводов общей теории относительности Эйнштейна: смещение изображений звезд вблизи солнечного диска продемонстрировало искривление лучей света в гравитационном поле.

В обычное время, между затмениями, мы не видим корону Солнца, потому что ее яркость намного меньше яркости дневного неба рядом с солнечным диском. Однако в космосе этой проблемы нет.

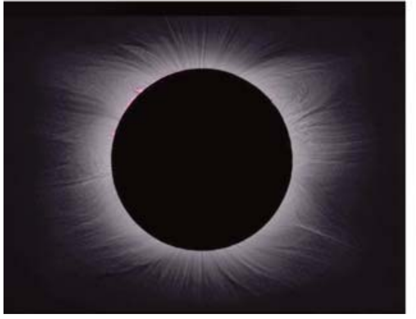



**Рис. 1.21.** **Эти два момента полного затмения разделены во времени всего несколькими минутами. На левом фото видна восточная часть хромосферы (это тонкий слой атмосферы Солнца между фотосферой и короной), а на правом — ее западная часть.**

Телескопы некоторых космических обсерваторий (например, SOHO) снабжены специальным экраном, которым можно закрыть изображение солнечного диска и увидеть околосолнечные окрестности — корону, протуберанцы, плотные потоки солнечного ветра, а также небольшие кометы, которые становятся заметными, только когда пролетают вплотную к Солнцу, и о существовании которых мы ранее даже не догадывались.

Для наблюдателя на Земле лунный диск так точно совпадает по угловому размеру с солнечным, что стоит Луне чуть-чуть сместиться, и она уже открывает нам полоску фотосферы Солнца, т. е. его видимого диска (рис. 1.21). Будь Луна чуть меньше — хотя бы на 2% — или располагайся она чуть дальше от нас, своим диском она уже не смогла бы закрыть фотосферу, и мы бы никогда не увидели с Земли солнечную корону: стоит появиться маленькому кусочку солнечного диска, как его свет, рассеянный в атмосфере, делает небо ярко-голубым, и никакая корона уже не видна. Эти снимки я показываю с удовольствием, потому что они сделаны современными любителями астрономии. Кто хорошо владеет фотокамерой и Фотошопом, может увидеть то, что раньше нельзя было заметить даже с телескопом.

Один из главных вопросов, встающих перед астрономом при подготовке к наблюдению какого-то небесного явления, в данном случае затмения: куда ехать, чтобы с наибольшей вероятностью получить желаемый результат? Факторов много: и количество ясного дневного неба в сезон наблюдения, и продолжительность явления, и его высота над горизонтом, и стоимость поездки, и политическая стабильность в регионе, и еще много других факторов.




**Рис. 1.22.** **Обстоятельства полного солнечного затмения 29 марта 2006 г. Путь лунной тени, движущейся с запада на восток, показан черной полосой. Параллельными ей линиями отмечены области частного затмения, достигающего максимальной фазы 0,9, 0,8 … по мере удаления от полосы полного затмения.**

На всей Земле в год можно наблюдать от двух до пяти солнечных затмений, из которых не более двух — полные или кольцеобразные. В среднем за 100 лет происходит 237 солнечных затмений, из которых 160 — частные, 63 — полные, 14 — кольцеобразные. Через одну и ту же точку земной поверхности лунная тень проходит в среднем раз в 300 лет. То есть если не гоняться по планете за полными солнечными затмениями, а жить на одном месте, то шанс увидеть своими глазами солнечную корону невелик.

Поскольку 2/3 поверхности земного шара покрыты океаном, путь лунной тени проходит в основном по поверхности воды. Но никто не наблюдает затмения с плавающего судна, так как для оптических приборов требуется устойчивая опора. Всегда выбирают область на суше, но и здесь у астронома много своих требований: не должно быть густой растительности, сильного ветра, высоких гор, закрыва-



**Рис. 1.23.** **Фото лунной тени, бегущей по облакам, в момент полного солнечного затмения. Снимок из космоса.**

ющих горизонт… Например, куда бы вы поехали, чтобы наблюдать затмение, случившееся 29 марта 2006 г.? Посмотрите на карту с обстоятельствами затмения и выберите наиболее привлекательное место… Правильно, в Турцию. Погода там, как правило, хорошая, перелет из России недорог, Солнце в момент затмения высоко над горизонтом, продолжительность полной фазы затмения близка к максимальной, поскольку место расположено недалеко от середины траектории лунной тени. Поэтому многие поехали именно туда, чтобы наблюдать это полное затмение, — и не ошиблись.

Любопытно, что несколько десятилетий назад, в один из предыдущих саросов (т. е. периодов времени, через которые почти в точности повторяются обстоятельства затмений), некоторые экспедиции выбрали Египет, где вероятность хорошей погоды и ясного неба еще выше, чем в Турции. Действительно, в момент затмения (и до, и после него) небо было безоблачным, но по этой причине случилось две беды. От высокой температуры пострадала светоприемная аппаратура, прежде всего эмульсия фотопластинок, на которые в ту эпоху велось фотографирование, а из-за ветра и пыли пришлось накрывать оптическую аппаратуру полиэтиленовой пленкой, которую быстро съели местные оголодавшие козы, и пыль повредила оптику.

Если вы в момент затмения посмотрите на Землю из космоса (рис. 1.23), то сразу поймете, с какими трудностями сталкиваются астрономы: лунная тень бежит по Земле, но она же ложится на облака, и астрономы, находящиеся в этот момент под облаками, не видят Солнца. Для преодоления этих проблем существует надежный вариант — нужно вести наблюдения с борта самолета, летящего над облаками в сторону движения лунной тени. В этом случае облачность

**Рис. 1.24.** Кольцеобразное солнечное затмение 3 октября 2005 г.



уже точно не страшна — всё увидите, хотя путешествие это дорогое. А если у вас еще и очень быстрый самолет, то вы можете продлить удовольствие от созерцания и изучения солнечной короны: в вашем распоряжении будут не минуты, а часы. Когда появился гражданский сверхзвуковой самолет «Конкорд», один из первых его рейсов был направлен именно в погоню за лунной тенью. Сверхзвуковой самолет способен ее догнать. Ведь Луна, а значит, и ее тень движется по орбите со скоростью около 1 км/с, а Земля вращается в ту же сторону, причем на экваторе со скоростью около 500 м/с. Значит, по поверхности Земли лунная тень бежит со скоростью от 1 км/с (в полярных областях) до 0,5 км/с (на экваторе). Поскольку диаметр лунной тени у Земли обычно не превышает 280 км, продолжительность полной фазы затмения для неподвижного наблюдателя, как правило, составляет не более 7 минут. А сверхзвуковой самолет, летящий со скоростью 1,5 М (т. е. около 500 м/с), в районе экватора может сопровождать лунную тень в течение нескольких часов!

Иногда Луна нас подводит. Это происходит в случае, если затмение наблюдается, когда Луна находится в апогее своей орбиты и не способна перекрыть солнечный диск целиком. Тогда ее тень не дотягивается до поверхности Земли — мы видим кольцеобразное (иногда говорят «кольцевое») солнечное затмение. Это явление почти бесполезное: в течение всего затмения остается виден яркий край поверхности (фотосферы) Солнца, поэтому корона остается незаметной. Но



**Рис. 1.25.** Солнечная корона. 1 августа 2008 г. Фото: M. Druckmüller, P. Aniol, V. Rušin. Снимок получен путем совмещения многих изображений, контраст усилен компьютерной обработкой.

польза от кольцеобразного затмения все-таки есть. Можно легко отследить моменты касания видимого диска Луны с видимым диском Солнца — всего четыре касания. Эти четыре момента времени регистрируют с высокой точностью (до $^{1}/_{1000}$ секунды), что позволяет проверять точность теории движения Луны и вращения Земли.

На фотографии затмения 2008 г. (рис. 1.25) мы видим солнечную корону. Видно, что на самом деле корона нигде не кончается — это бесконечные потоки газа, которые уходят с поверхности Солнца и

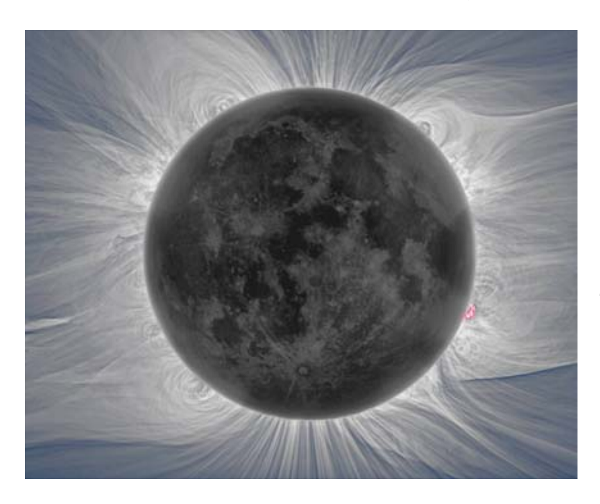


**Рис. 1.26.** Солнечное затмение 11 июля 2010 г. Хорошо заметны детали лунной поверхности. Фото: M. Druckmüller, M. Dietzel, Sh. Habbal, V. Rušin.

уже не возвращаются к ней. Со скоростью звука и даже быстрее они несутся во все стороны от Солнца, в том числе и к Земле. Но обратите внимание: Луна тоже видна, хотя прямые солнечные лучи на нее не попадают. Что же подсвечивает темную сторону Луны? Это свет от Земли! В момент затмения обращенное к Луне полушарие Земли почти полностью освещено Солнцем, за исключением небольшого пятачка лунной тени. Отраженный от Земли свет уходит в сторону Луны, и мы видим ее ночное полушарие (рис. 1.26). Впрочем, и вне затмений это явление легко можно наблюдать: если вы посмотрите на молодой месяц сразу после новолуния, то увидите, что темная часть лунного диска все-таки видна как бледно-серая; называется это явление *пепельным светом* Луны. И в этом случае отраженный от Земли свет подсвечивает темную сторону Луны. Поэтому на видимой стороне Луны, на ее полушарии, постоянно обращенном в сторону Земли, никогда не бывает полной ночи. Там бывают яркий солнечный день и полутемная ночь, которую условно можно назвать «земной ночью». Наш земной шар довольно ярко освещает Луну. Здесь, на Земле, в полнолуние мы можем гулять без фонаря ночью и даже читать при Луне крупный текст. А Земля на лунном небе занимает в 13 раз бóльшую площадь и отражает солнечный свет в несколько раз лучше лунной поверхности. Так что «земной ночью» поверхность видимого полушария Луны освещена так же ярко, как если бы на нее светили несколько десятков полных Лун. Будущим исследователям Луны не придется заботиться о ночном освещении, пока они будут работать на видимой стороне. Зато на обратной стороне Земля не видна, и ночи там очень темные.

Про условия наступления затмения вкратце уже говорилось. Нам важно понять, что раз орбита Луны наклонена на 5 с лишним градусов к эклиптике, а размер видимого диска — всего 0,5°, то лунная тень, как правило, проходит мимо Земли. И только когда три тела — Солнце, Луна и Земля — располагаются на одной прямой, лунная тень попадает на Землю. То же самое с затмениями Луны: земная тень проходит либо выше, либо ниже Луны и лишь изредка попадает на нее. Причина этого — несовпадение плоскостей орбит.

### Прохождения планет по Солнцу

А еще астрономы очень дорожат наблюдениями прохождения планет на фоне солнечного диска. Дело тут вот в чем. Уже очень давно астрономы научились измерять относительные размеры ор-



**Рис. 1.27.** **Джереми Хоррокс за наблюдением прохождения Венеры по диску Солнца. Фрагмент картины английского художника В. Лавендера (1903).**

бит планет. Измерить, во сколько раз диаметр орбиты Венеры меньше земной орбиты, — простая геометрическая задача. Но реального масштаба размеров орбит Солнечной системы мы долго не знали. Разумеется, всё было бы намного проще, если бы радиолокацию изобрели лет на 300 раньше, но у астрономов XVII–XVIII вв. не было такого метода, а значит, оставался единственный способ — наблюдать прохождение планет на фоне солнечного диска, чтобы измерить их параллакс. Лишь две планеты — Венера и Меркурий — время от времени проходят на фоне Солнца, причем Венера привлекательнее, поскольку она ближе к Земле, из-за чего ее параллакс больше и измерить его легче.




**Рис. 1.28.** **Уильям Крабтри с семьей наблюдает прохождение Венеры по диску Солнца — впервые в истории человечества (фреска Ф. И. Брауна, XIX в.).**

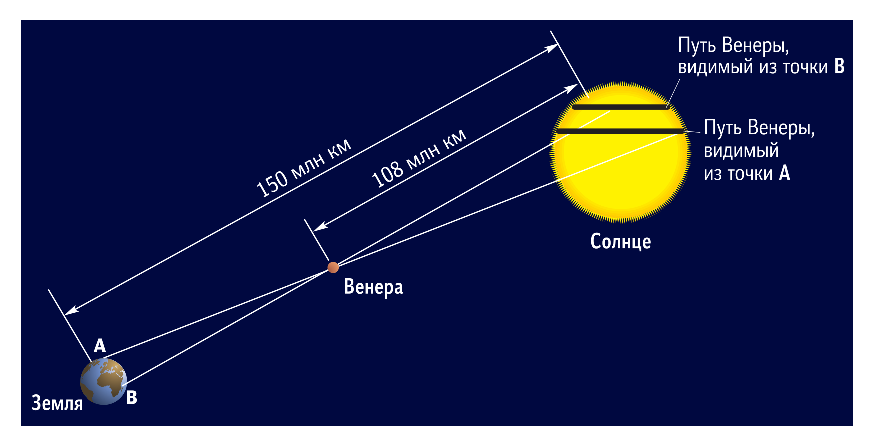



**Рис. 1.29.** **Уточнение астрономической единицы путем измерения параллакса Венеры на фоне Солнца.**

Случается такое явление редко. Плоскость венерианской орбиты и плоскость земной (эклиптика) не совпадают. Наблюдать Венеру на фоне Солнца можно только тогда, когда Земля и Венера находятся в районе пересечения двух плоскостей — в узлах венерианской орбиты. Впервые это явление наблюдали и описали его в середине XVII в. два англичанина — Джереми Хоррокс и его друг Уильям Крабтри.

Это небесное явление дало возможность измерить расстояние между Землей и Венерой, а значит, и между Землей и Солнцем, а затем вычислить расстояния между всеми планетами, причем не в относительных единицах, а в километрах. Так астрономы вычислили все расстояния в Солнечной системе. Это стало очень важным до-

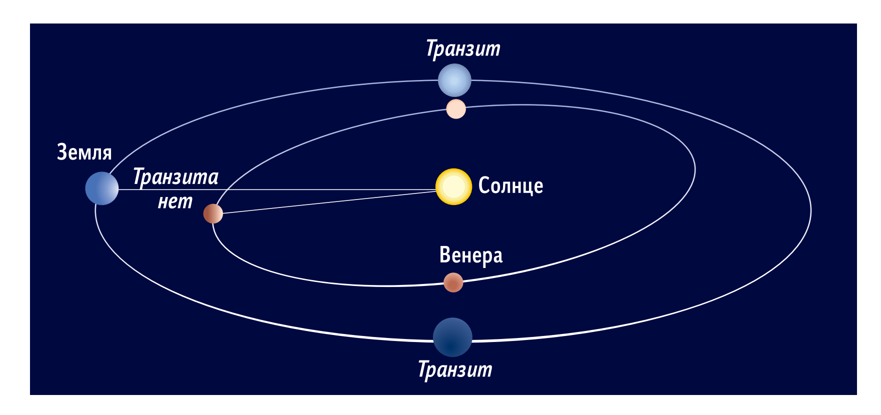
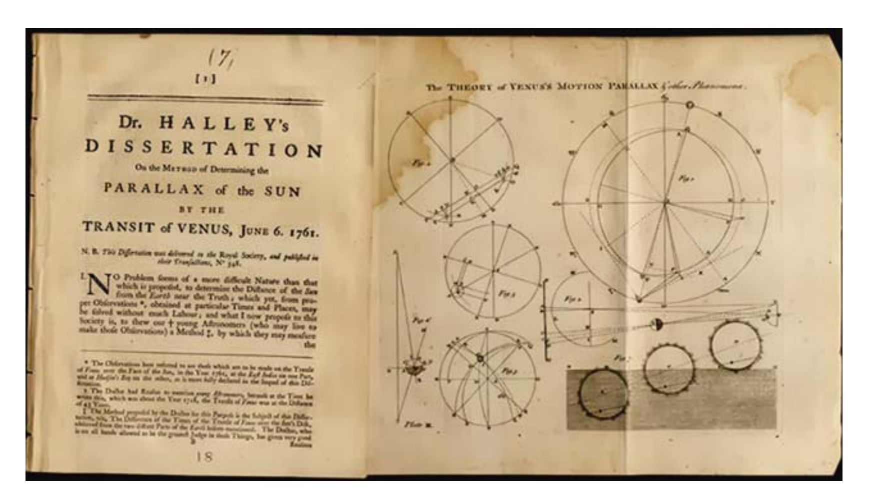



**Рис. 1.30.** **Транзиты Венеры, т. е. ее прохождения на фоне солнечного диска, можно наблюдать, когда Венера и Земля находятся вблизи узлов орбиты Венеры.**



[ 1 ]

Dr. HALLEY's
DISSERTATION
On the Method of Determining the
PARALLAX of the SUN
BY THE
TRANSIT of VENUS, June 6. 1761.

N. B. This Dissertation was delivered to the Royal Society, and published in their Transactions, N° 348.

I. NO Problem seems of a more difficult Nature than that which is proposed, to determine the Distance of the Sun from the Earth near the Truth; which yet, from proper Observations *, obtained at particular Times and Places, may be solved without much Labour; and what I now propose to this Society is, to shew our † young Astronomers (who may live to make those Observations) a Method ‡, by which they may measure the

18



**Рис. 1.31.** **Диссертация Эдмонда Галлея с расчетами, позволяющими вычислить расстояние между Землей и Солнцем по наблюдениям транзита Венеры.**

стижением. Фактически расстояние от Земли до Венеры было измерено методом суточного параллакса. Этот метод предложил Эдмонд Галлей, он заключался в измерении продолжительности прохождения Венеры по диску Солнца при наблюдении из различных точек

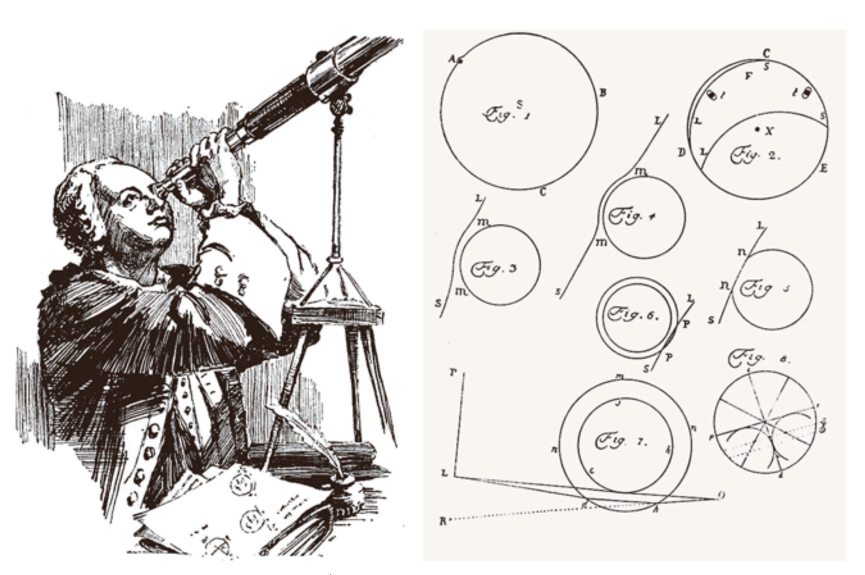




**Рис. 1.32.** **М. В. Ломоносов наблюдает за прохождением Венеры по диску Солнца 26 мая 1761 г. из своей петербургской квартиры. Справа — иллюстрации Ломоносова в его рукописи «Явление Венеры на Солнце...» (1761).**

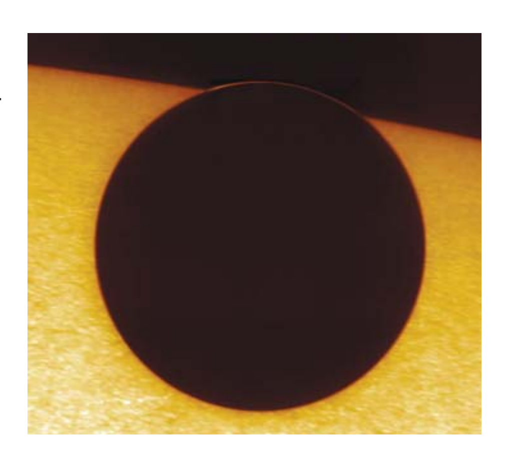
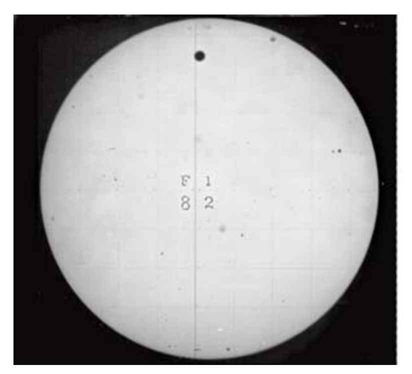


**Рис. 1.33.** Явление Ломоносова, сфотографированное с помощью 1-метрового Шведского вакуумного солнечного телескопа на острове Ла-Пальма (Канарские о-ва).

Земли, разнесенных по широте. Так как Венера проходит не через центр солнечного диска, то по времени прохождения можно установить длину хорды видимого пути планеты, а по различию этих величин, измеренных в разных точках Земли, определить угловое смещение планеты относительно диска Солнца — ее параллакс, а значит, и расстояние до планеты. При этом наблюдения были достаточно просты, для их проведения требовались только телескоп и простые часы, чтобы измерить небольшие промежутки времени.

В 1761 г. при наблюдении прохождения Венеры неожиданное открытие сделал, как утверждает история, наш соотечественник М. В. Ломоносов. В тот год для наблюдения транзита Венеры, чтобы измерить ее параллакс, во все части света отправились многочисленные академические экспедиции с самыми квалифицированными астрономами. Ломоносову в тот момент было уже около 50 лет,





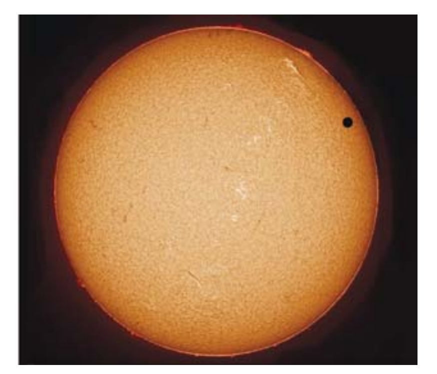


**Рис. 1.34.** Прохождение Венеры по диску Солнца. *Слева* — фото 6 декабря 1882 г., *справа* — 8 июня 2004 г.

он болел, плохо видел и никуда не поехал — остался наблюдать явление в простенький телескоп из окна своего дома в Санкт-Петербурге. И он единственный из всех наблюдателей не только заметил и описал, но и понял это удивительное явление.

Когда темный диск Венеры подходил к краю солнечного диска, перед ним вырос, как написал Ломоносов, «пупырь», яркий ободок. Это было преломление солнечных лучей в атмосфере Венеры. Ломоносов совершенно верно интерпретировал увиденное, тогда он и написал, что у Венеры «знатная атмосфера». Загадка в том, как, учитывая все условия, он мог увидеть то, что сейчас можно увидеть отчетливо только при помощи суперсовременного вакуумного телескопа. Видимо, сработала интуиция — все-таки великий ум.

Если бы наличие у Венеры атмосферы не подтвердилось — ничего страшного, Ломоносов не утратил бы своего статуса в научном мире. Но атмосфера у Венеры есть, и значение гения Ломоносова стало еще более весомым. Это явление во всем мире называется «явлением Ломоносова», и мы используем его, когда изучаем далекие планеты — экзопланеты, находящиеся у других звезд.

### Истинное движение планет

Видимое движение планеты складывается из движения в пространстве наблюдателя и самой планеты. Вот посмотрите, как в 2007 и 2008 гг. Марс «гулял» на фоне звездного неба: ехал-ехал, остановился, поехал назад, вновь остановился, а затем продолжил движение вперед. Как-то странно он себя ведет, не правда ли? А ничего странного в этом нет, если вспомнить, что мы наблюдаем его с движущейся Земли.

Марс обращается по своей орбите в одном направлении, не меняя его. Мы вместе с Землей обращаемся вокруг Солнца в том же направлении, но движение Земли происходит быстрее и по более короткой орбите. При этом оно складывается с более медленным движением Марса по более длинной орбите. Вот и получаются в сумме такие «кренделя», которые сильно озадачивали древних астрономов. Вся грандиозная картина звездного неба движется идеально равномерно, а планеты на фоне звезд блуждают туда-сюда. Нужно было как-то объяснить такое поведение планет и научиться его прогнозировать, создав для этого математическую теорию. И создали, взяв за основу простую механическую модель. Планета равномерно обращается по малой окружности (эпициклу), центр которой движется по боль-

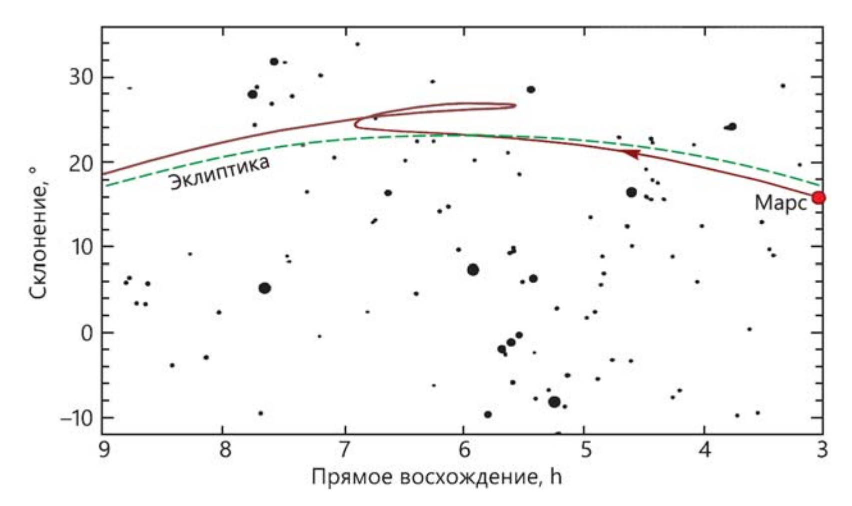



**Рис. 1.35. Движение Марса по небу с июля 2007 г. по июнь 2008 г.**

шой окружности (деференту), в центре которой — кто бы сомневался! — располагается неподвижная Земля. Складывая два равномерных круговых движения, получаем с точки зрения земного наблюдателя петлеобразную траекторию планеты. Простая и красивая идея!

Окончательный вид этой теории придал во II веке н. э. греческий математик, астроном и географ Клавдий Птолемей в своем гениальном «Альмагесте». Он довел эту модель до великолепного состояния. Птолемей понимал, что видимое движение планет значительно сложнее, чем можно изобразить с помощью одного эпицикла, «насаженного» на деферент. Значит, эту небесную «коробку передач» нужно было усложнить. На первый эпицикл Птолемей «посадил» второй эпицикл с иным периодом, размером и наклоном; на него — третий... Что это вам напоминает? Ну конечно же, ряд Фурье! Любое циклическое движение можно разложить на сумму простых синусоидальных колебаний. Птолемей не знал Фурье-анализа, но он интуитивно представлял сложное движение планет в виде серии простых синусоидальных (гармонических) колебаний. Все это изложено в книге Клавдия Птолемея «Альмагест, или Математическое сочинение в тринадцати томах». В переводе с древнегреческого на русский она впервые была издана в 1998 г. Хотите заработать комплекс неполноценности — попробуйте ее прочитать.

Теорией Птолемея ученые пользовались полторы тысячи лет, до эпохи Коперника, — завидное долголетие для любой научной тео-



**Рис. 1.36.** Клавдий Птолемей (II век н. э.) с астрономическим посохом в руке. Условный портет из книги XVI в. Астрономический посох (radius astronomicus), или «посох Якова», — простейший прибор для измерения угловых расстояний на небесной сфере. По основной градуированной линейке скользит подвижная линейка с диоптрами на концах. Глядя от основания главной линейки, малую перемещают так, чтобы диоптры совпали с объектами измерения, например двумя звездами или горизонтом и светилом.

рии. Но Коперник задался вопросом, почему у разных планет много одинаковых эпициклов с одинаковыми периодами. Он предложил поместить в центр системы не Землю, а Солнце, поскольку понимал, что на самом деле мы наблюдатели и мы движемся, поэтому и планеты перед нашими глазами синхронно описывают петли. Коперник поместил в центр Солнце, но не смог отказаться от круговых орбит. Поэтому в его системе мира у планет сохранились некоторые эпициклы.

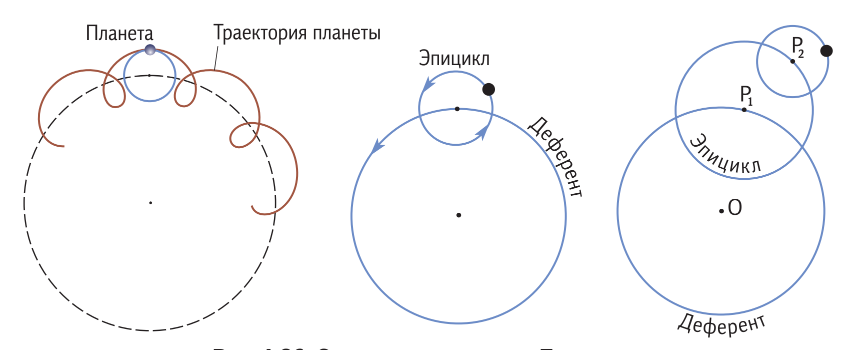



**Рис. 1.36.** Система эпициклов по Птолемею.

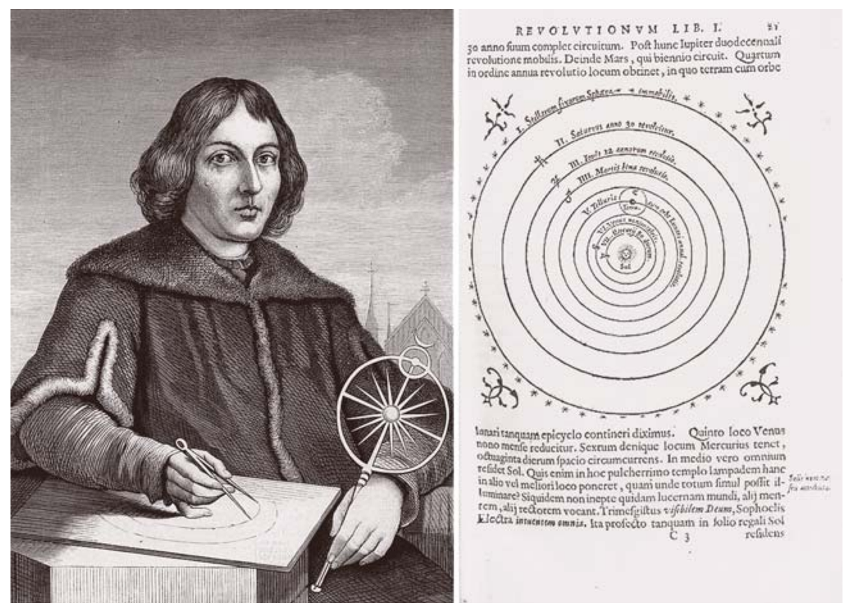



**Рис. 1.37.** Николай Коперник и страница его книги «О вращении небесных сфер».

Теория Коперника была проще теории Птолемея. Почему же она не сразу завоевала признание ученых? Потому что она противоречила некоторым наблюдательным фактам. Если Земля совершает периодическое движение по орбите, то должны наблюдаться не только петли на траекториях планет, но и регулярное параллактическое смещение звезд, а его в ту эпоху заметить не удавалось. Во второй половине XVI в. точность астрономических наблюдений не превышала 1 минуты дуги, а параллаксы звезд, как мы теперь знаем, не превышают 1 угловой секунды. Астрономам понадобилось три с половиной столетия, чтобы изобрести телескоп, усовершенствовать методы наблюдения и повысить их точность в 100 раз, прежде чем они надежно зафиксировали параллаксы ближайших звезд. Но кто мог знать в эпоху Коперника, что звезды от нас так далеки!

Не знал этого и Тихо Браге — лучший астроном эпохи Коперника. Он был уверен в непревзойденной точности своих наблюдений, однако звездных параллаксов заметить не смог, а потому решил, что Земля стоит на месте. И ведь в рамках научного метода он был абсолютно прав. Сегодня, используя орбитальное движение Земли, мы измеряем расстояние до звезд именно по их параллактическому смещению. Но кто мог знать в ту эпоху, что оно такое маленькое?

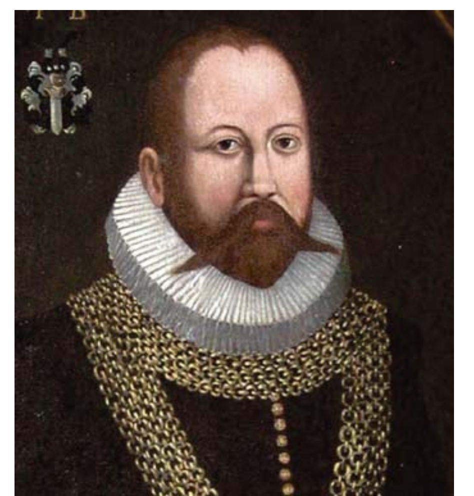


**Рис. 1.38.** Тихо Браге.



**Рис. 1.39.** Иоганн Кеплер.

Опираясь на наблюдения, Тихо Браге не позволил Земле сдвинуться с места, но и теория Коперника ему тоже нравилась своей элегантностью. Поэтому Тихо создал свою, эклектическую, модель мира (рис. 1.40): Земля покоится в центре, Луна и Солнце обращают-

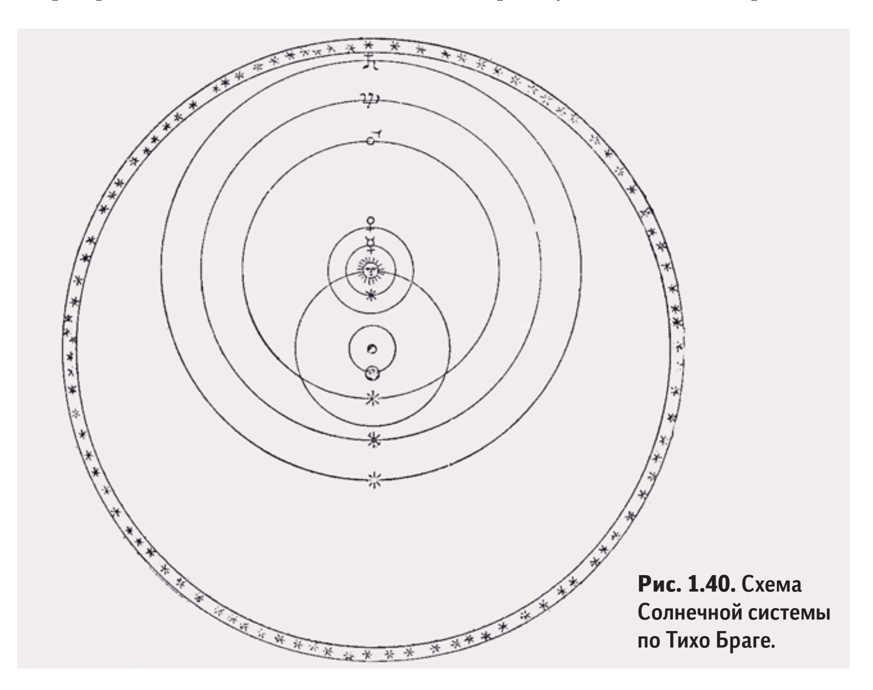


**Рис. 1.40.** Схема Солнечной системы по Тихо Браге.

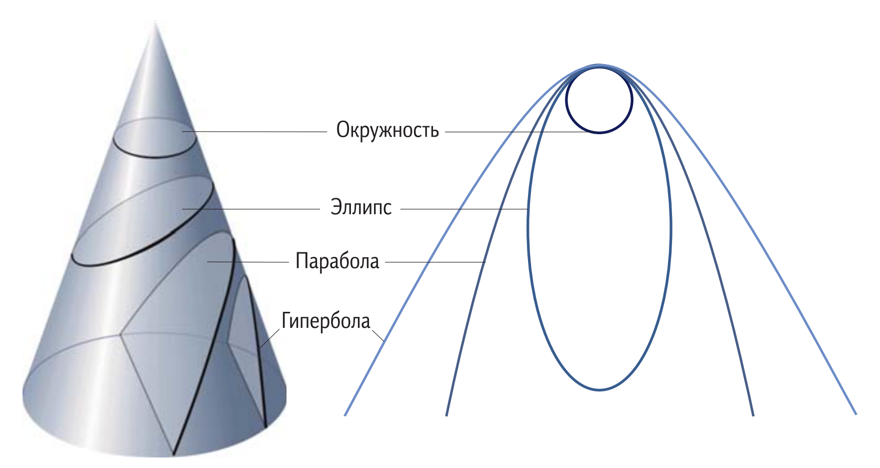



**Рис. 1.41.** **Сечения эллипса — возможные орбиты небесных тел.**

ся вокруг нее, а все остальные планеты — вокруг Солнца. В ту эпоху это была вполне научная теория, объяснявшая все наблюдательные факты. Но просуществовала она недолго. Молодой сотрудник Тихо Браге немецкий математик Иоганн Кеплер перевернул своими расчетами всю небесную механику.

К концу жизни Тихо Браге понял, что он хоть и первоклассный наблюдатель, но математик слабый, а потому для обработки своих многолетних наблюдений пригласил Иоганна Кеплера — прекрасного математика с плохим зрением, человека, который ни разу в жизни не смотрел в телескоп. Кеплер, взяв за основу теорию Коперника, нашел для орбит форму, которая наилучшим образом объясняла их видимое движение (эллипс), и вывел эмпирические законы движения планет: первый, второй и третий законы Кеплера.

Первые два закона описывают орбиту планеты и характер движения по ней, а третий закон связывает между собой орбитальные параметры двух разных планет одной системы. Вот эти законы.

1. Каждая планета обращается по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

2. Каждая планета движется в плоскости, проходящей через центр Солнца, причем за равные промежутки времени радиус-вектор, соединяющий Солнце и планету, описывает равные площади.

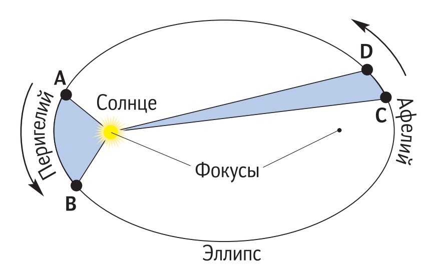



**Рис. 1.42.** **Первый и второй законы Кеплера.**

3. Квадраты периодов обращения планет ($T$) вокруг Солнца относятся как кубы больших полуосей орбит планет ($a$).

Эти эмпирические законы движения планет помогли Исааку Ньютону сформулировать закон всемирного тяготения ($F \sim 1/R^2$) и сами получили теоретическое обоснование в рамках Ньютоновой механики. Ньютон уточнил и расширил законы Кеплера. Он доказал, что кроме эллиптических орбит, характерных для гравитационно связанных систем, возможно движение и по другим коническим сечениям — параболе и гиперболам, описывающим однократное сближение (пролет) двух гравитационно не связанных тел.

Второй закон Кеплера оказался частным случаем фундаментального закона природы о сохранении момента импульса в изолированной системе. А третий закон, сформулированный Кеплером для двух маломассивных тел (планеты 1 и 2), обращающихся вокруг одного массивного (звезда):

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

Ньютон обобщил на случай двух разных двойных систем (1 и 2) с произвольными массами компонентов ($M_1$, $m_1$ и $M_2$, $m_2$):

$$\frac{T_1^2 (M_1 + m_1)}{T_2^2 (M_2 + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}.$$

Астрономы с успехом применили эту формулу не только к спутниковым системам разных планет Солнечной системы, но и к двойным звездам, получив возможность определять их массы. Это сделало закон гравитации Ньютона поистине всемирным.



# 2 Основы небесной механики

Изучение физики обычно начинают с классической механики. Статистическую физику или квантовую механику интуитивно понять трудно, а классическая механика — это то, что у нас постоянно происходит перед глазами: кирпичи падают, мячики летают. Законы механики мы ощущаем на уровне интуиции, потому что с нами, людьми, происходит то же самое: время от времени мы падаем, иногда даже летаем. Так что небесная механика, самая изящная часть астрономии, для физика должна быть тоже интуитивно понятной.

За одну лекцию изучить небесную механику — дело нереальное, поэтому знакомиться с ней мы будем бегло. Советую вам прочитать замечательную книжку «Очерки о движении космических тел» Владимира Васильевича Белецкого — это один из наших сильнейших небесных механиков. Картинки там прекрасные, формулы тоже, и вообще от ее чтения получаешь наслаждение.

Итак, сегодня мы будем знакомиться только с основными идеями и простейшими формулами. Есть, к примеру, у нас планета (или любое другое небесное тело). Она движется и развивается под действием каких-то сил (рис. 2.1): гравитационных и негравитационных (светового давления, прямых ударов других тел). Есть также внутренние силы, которые вызывают деятельность вулканов, движение материков. Но сегодня мы будем говорить только о гравитации. И тему гравитации мы поделим пополам.

Первая часть представляет самый простой подход к изучению движения небесных тел. Поскольку большие небесные тела практически шарообразны (о причинах этого я скажу ниже), их притяжение друг к другу можно описать притяжением материальных точек, расположенных в центрах тел и содержащих всю их массу (это мы тоже сегодня докажем). В этом случае неплохо работает очень простой, известный даже школьникам закон Ньютона. Правда, он не вполне правилен, общая теория относительности (ОТО) корректнее описывает гравитацию, но для нас это пока несущественно.

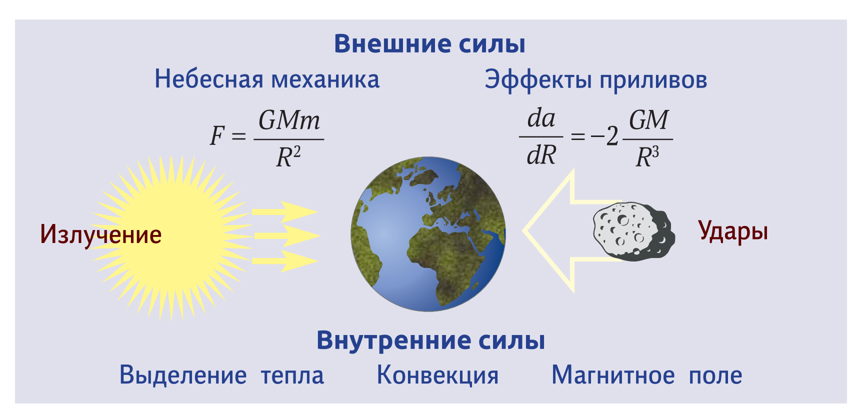



**Рис. 2.1.** Различные силы, воздействующие на планету.

Есть более тонкий подход. Он учитывает, что тела являются протяженными и что все их конкретные точки находятся на разных расстояниях от соседнего тела. Значит, в общем случае нельзя подставлять одно и то же расстояние в первую формулу (рис. 2.1), надо учитывать зависимость гравитационной силы от расстояния до притягивающего тела (вторая формула). Это уже второе приближение к истине, и называется оно *теорией приливов*. Приливы — вообще штука интересная и очень важная, но об этом — в одной из следующих лекций. А сегодня будем говорить только о небесной механике.

## Самая слабая сила

Давайте посмотрим на запись закона всемирного тяготения Ньютона, связывающего силу притяжения $F$ между двумя материальными точками, в которых сосредоточены массы $M$ и $m$, разделяемые расстоянием $R$: $F = GMm/R^2$, — и осозна́ем одну неприятную вещь. А именно: значение коэффициента пропорциональности $G = 6{,}672 \cdot 10^{-11}$ Н·м²/кг², называемого гравитационной постоянной, очень мало́ в знакомых нам единицах измерения (метры, килограммы, ньютоны). Если сто граммов (столько весит полстакана воды) положить на ладошку — это будет сила тяжести в один ньютон.

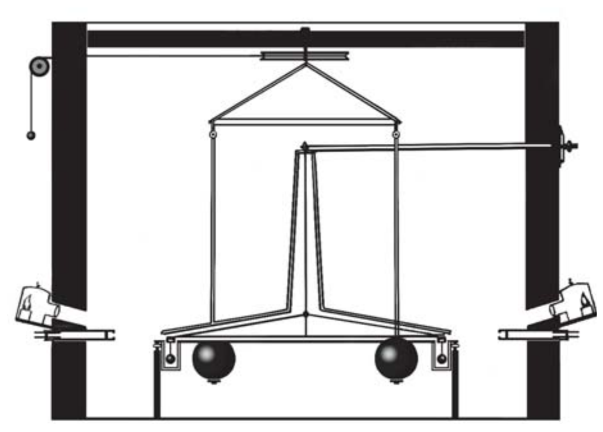
Прикинем, каковы гравитационные силы. Пусть каждый из вас весит порядка ста килограммов (не хочу никого обидеть, а лишь округляю для простоты вычислений) и вы находитесь в аудитории на расстоянии 1 метра друг от друга. Подставляем эти значения в формулу и находим силу взаимного притяжения: $F \sim 10^{-10} \cdot 100 \cdot 100/1^2 = 10^{-6}$ Н, это одна миллионная от силы в 100 граммов, или $^1/_{10}$ миллиграмма.

Это притяжение друг к другу вы не ощущаете, хотя закон говорит, что оно есть. То есть гравитация — самая слабая из всех природных сил, она практически неощутима. Почему же мы чувствуем, что нас притягивает к сиденью?

Очень малое значение гравитационного коэффициента говорит о том, что только большие массы могут ощутимо взаимодействовать друг с другом. Например, масса всей Земли — большая, поэтому мы ощущаем притяжение к ней. А сидя рядом друг с другом, даже и не догадываемся, что существует сила гравитации.

Есть и другая особенность. Если сравнить значение этой физической константы с другими, например зарядом электрона $e = 1{,}60217739 \cdot 10^{-19}$ Кл, что сразу бросается в глаза? Огромная разница в количестве значащих цифр. Естественно задать вопрос: электроном, значит, физики интересуются, измерили его заряд до десяти значащих цифр, а гравитацию почему-то проигнорировали? Почему они не хотят измерить ее точно?

Отнюдь нет — хотят, но не могут. Ведь в формулу наряду с $G$ входит величина $M$, но откуда мы можем знать массу Земли — кто-то ее взвешивал? Ее ведь на весы не положишь. Ускорение свободного падения $a = F/m$, а значит, и произведение $G \cdot M$ мы можем измерить точно. Но чтобы отделить их друг от друга, надо действовать как-то по-другому. Например, можно сначала взвесить тело на весах, а потом посмотреть, как оно притягивает соседей. Для этого «древний» английский физик Дж. Мичелл (1793) придумал крутильные весы (рис. 2.2, 2.3) — очень чувствительный прибор, с помощью которого другой английский физик, Г. Кавендиш (1798), впервые измерил си-



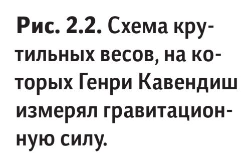


**Рис. 2.2.** Схема крутильных весов, на которых Генри Кавендиш измерял гравитационную силу.

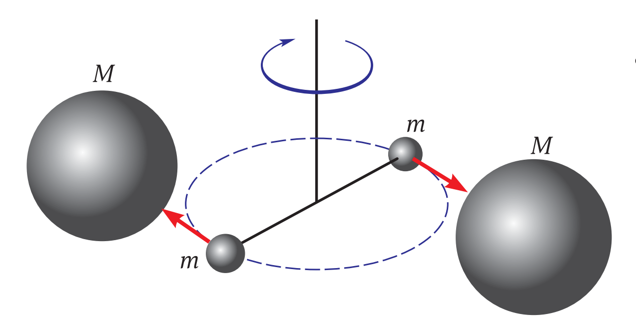



**Рис. 2.3.** Принципиальная схема крутильных весов.

лу гравитационного притяжения двух лабораторных тел и определил значение гравитационной постоянной Ньютона. В нашем институте (Государственный астрономический институт им. П. К. Штернберга, МГУ) сделали такую же и потом очень долго мучились, чтобы решить типичную для физиков проблему: отделить от изучаемого явления все паразитные эффекты.

Сначала в этой константе была уверенно измерена только одна значащая цифра, в XIX веке узнали вторую, в середине XX века появился третий знак, совсем недавно — четвертый. Пятый еще пока пытаются выяснить: даже при использовании самых лучших методов он у всех определяется по-разному, большей точности достичь не получается.

### Движение двух тел

Единственное тело в абсолютной пустоте будет лететь по прямой, потому что никакие внешние силы на него не действуют, — это случай тривиальный и неинтересный. А простейшей задачей небесной механики считается задача двух гравитационно взаимодействующих тел. Но ее можно еще упростить, если взять одно тело очень массивное, а другое очень маленькое. Малое тело движется под влиянием центростремительного ускорения, а большому безразлично, что там вокруг него бегает, фактически оно не «чувствует» чужого присутствия и поэтому неподвижно. Эта ситуация называется задачей одно-

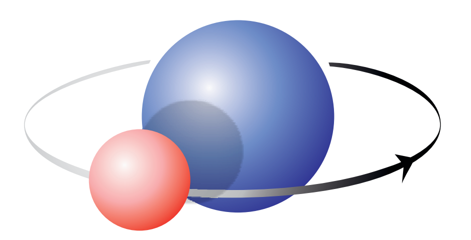
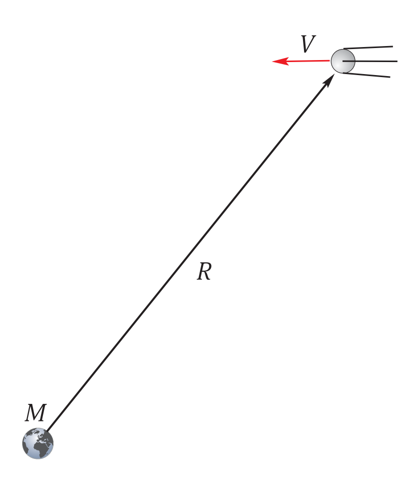


**Рис. 2.4.** Задача двух тел начинается с задачи о движении одного тела в центральном поле.

**Рис. 2.5.** **Легкий спутник на круговой орбите очень большого радиуса.**




го тела в центральном гравитационном поле (рис. 2.4).

Если начало системы координат совместить с массивным телом, то вследствие его неподвижности такая система координат будет инерциальной. И это может оказаться очень полезным. Например, для космического аппарата мы можем записать, что действующее на него центростремительное ускорение равно отношению силы гравитационного притяжения к его массе:

$$a = \frac{F}{m}.$$

Если он обращается на достаточно дальней круговой орбите (рис. 2.5), то, выполнив простое преобразование этой формулы, можно однозначно связать орбитальный период с массой притягивающего тела. Собственно говоря, это единственный надежный метод для определения массы планеты:

$$\frac{V^2}{R} = \frac{GM}{R^2};$$

$$P = \frac{2\pi R}{V} = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}};$$

$$M = \frac{R^3}{G(P/2\pi)^2}.$$

Но задача становится сложнее, когда спутник находится близко к планете: при этом уже нельзя пренебрегать ее размером и формой (рис. 2.6). Казалось бы, это задача очень сложная, потому что для решения надо вычислить притяжение спутника к каждой точке планеты и сложить векторы сил. Та же проблема у геофизика, который интересуется внутренностью планеты и хочет узнать, какова гравитация на нужной глубине: ему надо бы вычислить притяжение ко всем точкам внешней части и ко всем точкам внутренней части. К счастью, еще Ньютон доказал две простые, но очень полезные теоре-

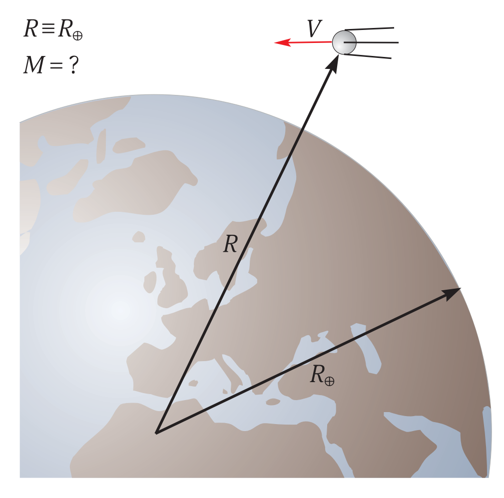



**Рис. 2.6. Легкий спутник на круговой орбите малого радиуса.**

мы, значительно облегчающие вычисления, — и за это ему спасибо.

Первая теорема говорит о том, что если у вас есть однородная по плотности сферическая оболочка, то внутри нее гравитация отсутствует и ускорение везде равно нулю. Доказательство можно продемонстрировать на пальцах. Для этого помещаем в произвольное место полости пробный шарик и смотрим, какие силы на него действуют со стороны двух диаметрально противоположных бесконечно малых сегментов (рис. 2.7, где сегменты для наглядности показаны большими):

$$S \sim R^2;$$

$$F \sim \frac{S}{R^2};$$

$$F_1 = F_2.$$

Площади и массы обоих сегментов прямо пропорциональны квадрату расстояния, а сила обратно пропорциональна квадрату расстояния, значит, оба оказывают на эту точку одинаковое по величине, но противоположно направленное влияние, то есть силы уравновешиваются. Таким образом, где бы ни находилось тело внутри оболочки, оно пребывает в состоянии невесомости. Более того: когда вы свободно падаете без опоры, вы тоже испытываете невесомость в течение короткого времени, пока не упали, а в полости вообще нет гравитационной силы, и «падать» там можно бесконечно долго.

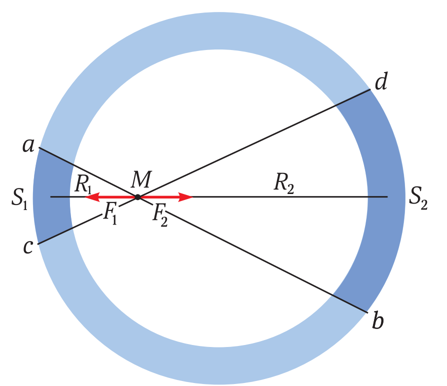



**Рис. 2.7. Теорема Ньютона о гравитации внутри однородной сферы.**

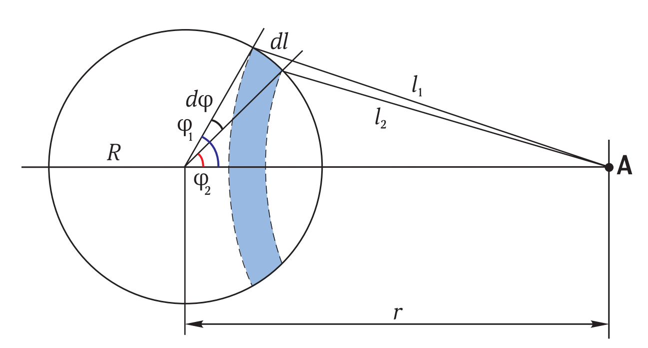



**Рис. 2.8.** Теорема Ньютона о гравитации вне однородной сферы (в точке А).

Теперь из последовательности таких оболочек мы можем собрать всю планету целиком и понять, что для вычисления ускорения свободного падения в какой-то внутренней точке достаточно учитывать только более глубокие слои. А принимать во внимание наружные по отношению к рассматриваемой точке слои, которые лежат поверх нее, т. е. ближе к поверхности, нет необходимости, потому что они никакого влияния не оказывают. В частности, это приближение верно для Земли, у которой плотность к центру растет, при этом на каждой выбранной глубине она под любой точкой поверхности почти одинакова. Геофизики «молятся» на эту теорему Ньютона, потому что она позволяет им легко вычислять гравитационное поле внутри шаровидных (сферически симметричных) космических тел. Но для тел другой формы это уже не справедливо.

Вторая теорема Ньютона касается притяжения однородной сферической оболочкой тела, расположенного снаружи. Оказывается, в этом случае оболочка действует на внешнее тело так же, как и материальная точка с той же массой в центре сферы. Для доказательства нужно вычислить гравитационную потенциальную энергию точечного тела единичной массы в зависимости от расстояния от этой точки до кольца, вырезанного в сфере (рис. 2.8). При этом ничего более сложного, чем теорема косинусов, не требуется.

Пусть у сферы единичная поверхностная плотность. Тогда потенциальная энергия в поле шарового пояса определяется так:

$$dU = -\frac{G\,2\pi R^2 \sin\varphi\; d\varphi}{l};$$

$$l^2 = R^2 + r^2 - 2rR\cos\varphi;$$

$$l\,dl = rR\sin\varphi\; d\varphi.$$

$$dU = -\frac{2\pi GR}{r}dl;$$

$$\Delta l = 2R.$$

Потенциальная энергия в поле всей сферы:

$$U = -\frac{4\pi GR^2}{l} = -\frac{GM}{r};$$

Ускорение в точке А:

$$a = \frac{dU}{dr} = \frac{GM}{r^2}.$$

Из серии сферических оболочек можно собрать массивную шаровидную планету или звезду, а значит, в ее поле тяготения движение всех малых объектов — как спутников, так и тел, пролетающих мимо, — можно рассчитывать в приближении, будто вся масса шара сосредоточена в центральной точке. Этот факт очень важен для астрономов, потому что все достаточно крупные космические тела почти сферичны, если они не очень быстро вращаются (иначе они становятся эллипсоидами и эти теоремы перестают работать).

Теперь давайте представим себе мир, в котором гравитация устроена не по Ньютону. С помощью простенькой компьютерной программы интегрирования уравнений движения попробуем «поиграть» с законом гравитации, меняя показатель степени $m$ при расстоянии $R$ в формуле Ньютона (рис. 2.9). В классическом случае $m = 2$. Запускаем пробное тело вокруг точечной массы и получаем ожидаемый результат: пробное тело бегает по одному и тому же эллипсу.

Если сделаем зависимость гравитации от расстояния более жесткой, увеличив показатель степени чуть-чуть, всего на 10%, то получится вот что: вроде бы движение происходит тоже по эллипсу, но он не остается неизменно ориентированным, его ось понемногу поворачивается — происходит прецессия оси. Теперь возьмем зави-

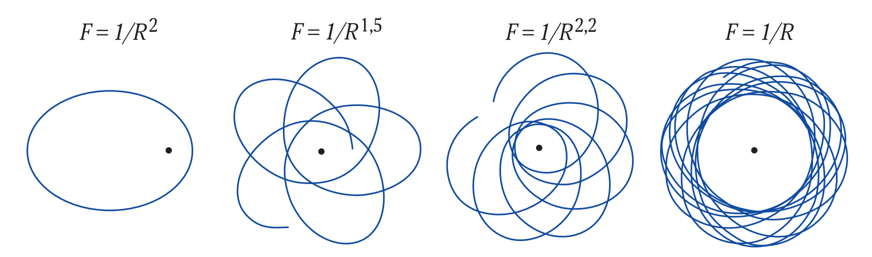



**Рис. 2.9.** Движение частицы в разных силовых полях.

симость $F(R)$ немного мягче ньютоновой, уменьшив $m$ на 25%. При таком законе тоже вырисовывается похожий эллипс, только вращающийся в противоположном направлении. Интересно, что если задать совсем уж невообразимый вариант $m = 1$ (т. е. $F \sim 1/R$), то угловая скорость прецессии оси становится близкой к угловой скорости обращения спутника.

Несмотря на то что движение кажется хаотичным, можно заметить, что во всех рассмотренных случаях есть границы движения, за которые тело никогда не вылетает. Механики называют такое движение финитным, то есть ограниченным в пространстве. Если бы у нас, например, в законе Кулона показатель степени при расстоянии вдруг «поплыл», то электрон по крайней мере не убежал бы от ядра и не упал бы на него: ну, двигался бы немного более «хитро», чем в нашем мире, но с этим жить можно. Главное — что атом остался бы стабилен, не распался бы.

Эти численные эксперименты — вовсе не блажь. Дело в том, что Ньютонов закон действителен только в слабых гравитационных полях; он является, так сказать, лишь первым приближением к реальности. А если вы возьмете уравнения общей теории относительности и на их основе попытаетесь получить ньютоновское приближение, то к основному компоненту $GM/R^2$ добавятся поправки — слагаемые, растущие с увеличением потенциала гравитационного поля. То есть в общей теории относительности гравитация более круто зависит от расстояния, чем в теории Ньютона. Поэтому есть особенность приближения к объектам очень большой массы, но малого размера.

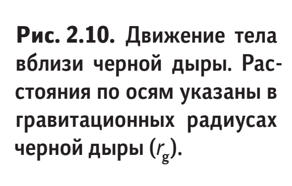
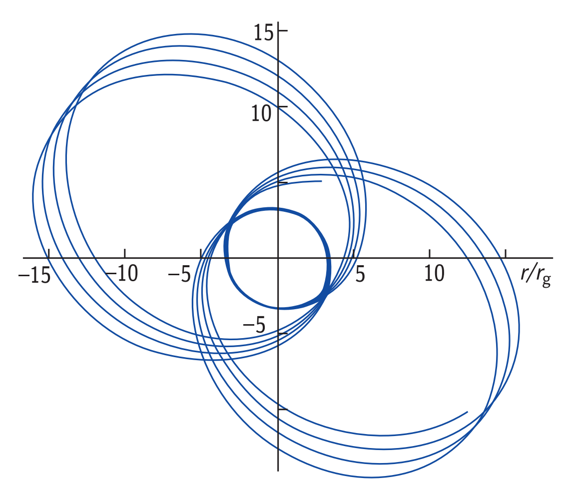


**Рис. 2.10. Движение тела вблизи черной дыры. Расстояния по осям указаны в гравитационных радиусах черной дыры ($r_g$).**



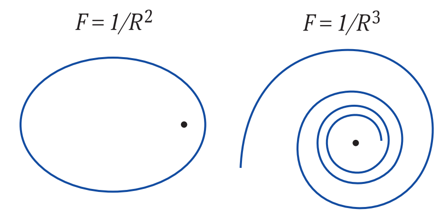



**Рис. 2.11. Движение в поле $F \sim R^{-3}$ принципиально отличается от кеплеровского.**

Вот как замысловато будут кружить объекты в окрестности черной дыры (рис. 2.10): на каждом обороте (от апоцентра до апоцентра) эллипс разворачивается на 180°. При этом происходит не медленный дрейф оси, как в ранее рассмотренных случаях, а прыжки сразу на полоборота. Так что наши «игры» с законом притяжения имеют смысл: они позволяют моделировать реальное гравитационное поле вблизи массивных, плотных объектов: нейтронных звезд и черных дыр.

А вот теперь я увеличил показатель на целую единицу ($m = 3$), сделав зависимость еще более жесткой по сравнению с ньютоновой: $F \sim 1/R^3$. Что мы видим: движение становится инфинитным, то есть пространственно неограниченным (рис. 2.11). Конечно, в принципе можно найти для частицы, находящейся на некотором расстоянии от тяготеющего центра, такую скорость, при которой частица пойдет по круговой орбите. Но это движение будет неустойчивым: стоит на какую-то мизерную долю изменить эту скорость, и частица, двигаясь по спирали, либо упадет на центр притяжения, либо навсегда уйдет от него. А в реальности какие-то случайные флуктуации всегда есть. Следовательно, в таком потенциальном поле ни атомов, ни планетных систем существовать не может.

Доказано (это довольно легко сделать), что в законах, описывающих силовые поля, показатель степени $m$ связан с геометрической размерностью физического пространства: он во всех случаях на единицу меньше, чем размерность пространства. Отсюда следует, что из записи фактических законов Кулона и Ньютона мы можем сказать, что наше пространство трехмерное и что четвертого пространственного измерения у нас нет, иначе все давно потеряло бы устойчивость, потому что атомы развалились бы.

### Орбитальные параметры

Когда небесные механики интересуются движением тел, они используют специальную систему координат. В принципе, можно было бы ничего не изобретать и взять декартовы координаты. Что нам нужно задать для частицы, чтобы потом рассчитывать движение по орбите? Начальное пространственное положение частицы и ее на-

чальную скорость. Это векторные величины в пространстве, т. е. каждая их них имеет три компонента. Итого шесть чисел полностью описывают состояние частицы в пространстве. Больше ничего не требуется, у нас есть формула для вычисления гравитационной силы, действующей на небесное тело, и законы механики позволяют нам рассчитать, как она будет двигаться, т. е. положение и скорость в любой момент времени.

Но реально для небесной механики такой подход чаще всего не реализуется: он слишком сложен. Ведь если у нас есть только один тяготеющий центр, то любая отпущенная на свободу частица, какую бы скорость мы ей первоначально ни задали, под действием гравитации будет летать в плоскости и никуда из этой плоскости не выйдет. Иными словами, у любой частицы есть своя орбитальная плоскость. Вот с ней и любят работать небесные механики, потому что она сразу уменьшает количество пространственных измерений. По крайней мере на одно: если мы знаем, что тело движется в плоскости, то перпендикулярную ей компоненту скорости и расстояние можно отбросить. А чем меньше уравнений, тем легче решать.

Но надо задать, как орбитальная плоскость рассматриваемого объекта располагается в пространстве (рис. 2.12). Для этого, естественно, сначала выбирается базовая координатная плоскость, от которой ведется отсчет (обычно это плоскость эклиптики Солнечной системы). Чтобы описать, как в пространстве располагается орбитальная плоскость относительно базовой, надо определить угол, под которым они пересекаются. Этот угол называется *наклонением*.

Важно не запутаться в терминах, потому что астрономы употребляют два похожих слова: «наклонение» и «наклон», которые означают вовсе не одно и то же. В отличие от наклонения, *наклоном* назы-

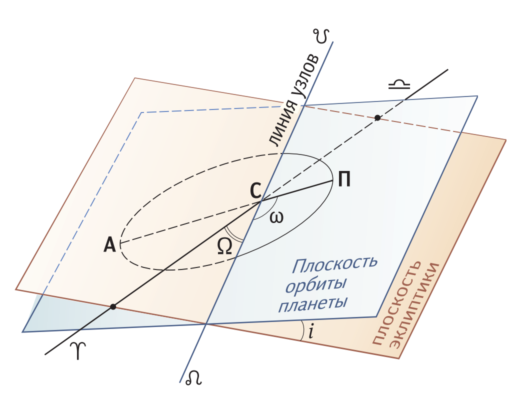



**Рис 2.12.** **Элементы орбиты: ☊ и ☋ — восходящий и нисходящий узлы орбиты; *i* — наклонение; Ω — долгота восходлящего узла (из южного полушария в северное); ω — угловое расстояние от восходящего узла до перицентра.**

вают угол между осью собственного вращения планеты и перпендикуляром к ее орбитальной плоскости (например, наклон земной оси равен 23,4°). Пересечение орбитальной и базовой плоскостей называется *линией узлов.* Эта прямая проходит через два узла: восходящий и нисходящий. *Восходящий узел* — точка, где планета из южной полусферы неба переходит в северную, а *нисходящий* — где планета «ныряет» из северного полушария в южное. Обозначаются они соответственно символами ☊ и ☋.

Второй параметр, который надо указать для небесных координат, определяет ориентацию линии узлов в пространстве. Базовое направление мы можем задать на точку весеннего равноденствия, Солнце проходит через нее каждый год. Угол Ω между линией узлов и базовым направлением называется *долготой восходящего узла.*

Итак, орбитальную плоскость, наклонение и ориентацию мы определили. Теперь надо определить характер движения планеты в этой плоскости. В простейшем случае, когда система состоит из одной звезды и одной планеты, она движется по эллипсу, а у эллипса есть лишь две характеристики: размер и форма. Размер — это длина большой оси, а форму можно определить через параметр *эксцентриситет.*

Четыре параметра у нас есть — вроде бы достаточно? Ан нет! Как ориентирован в орбитальной плоскости сам эллипс? Надо указать угол его ориентации — например, между линией узлов и направлением на перицентр П (точку орбиты, ближайшую к центру притяжения).

Итак, пять параметров указали; можем ли мы наконец произвести расчет движения планеты в будущее и в прошлое? Нет, нам надо знать, где планета на этом эллипсе находится в начальный момент времени, чтобы начать вычисления. Например, можно задать момент времени, когда она проходит через перицентр, апоцентр или какую-то другую определяемую точку, — это уже шестой параметр.

Таким образом, шесть величин задают полный набор начальных условий, ровно столько их было и в декартовых координатах. Но параметры в небесных координатах позволяют проще решать задачу, это можно сделать даже аналитически.

### Как летают спутники

Если нам надо рассматривать движение искусственных спутников Земли, то определять базовую плоскость через эклиптику, т. е. брать в качестве базовой плоскость орбиты нашей планеты, особого смысла нет. Ведь спутники всегда летают не очень далеко от Земли,

им нет никакого дела до того, как она сама движется вокруг Солнца. Поэтому наклонение плоскости орбиты спутников обычно отсчитывают от земного (он же — небесный) экватора (рис. 2.13). Плоскость земного экватора в этом отношении очень полезна, потому что планета у нас довольно симметрична относительно экватора, что упрощает математические расчеты. Остальные параметры определяют аналогично: например, направление линии узлов отсчитывают, как всегда, от точки весеннего равноденствия.

Теперь давайте посмотрим, как могут двигаться спутники после запуска. Подвешиваем тело над Землей и сообщаем ему импульс. Например, по какой линии движется камень, брошенный под углом к горизонту? Школьный учебник утверждает, что по параболе. Но так ли это?

По этой кривой тела движутся в однородном поле гравитации, когда ускорение свободного падения направлено везде одинаково. Но наша Земля — не плоскость бесконечной протяженности (как ее в древности представляли, лежащей на слонах и китах), а шар, т. е. она притягивает к своему центру как точка (выше мы говорили, что это следует из второй теоремы Ньютона). Поэтому, как бы мы ни кинули тело, оно полетит по эллипсу. Если с маленькой скоростью, то оно упадет, но все равно при этом будет двигаться по дуге эллипса.

Давайте теперь будем бросать тело горизонтально со всё большей и большей скоростью. Сначала оно будет ударяться о поверхность Земли, заканчивая свое эллиптическое движение, при этом

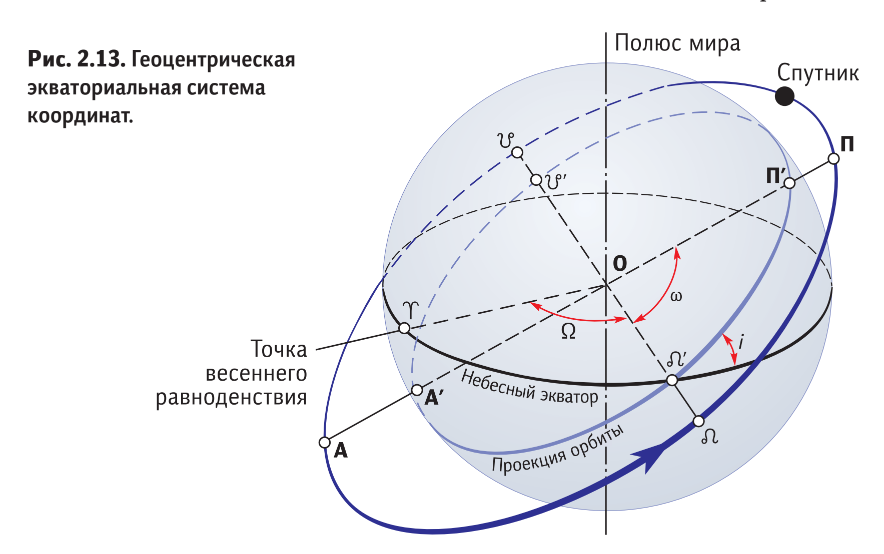



**Рис. 2.13.** **Геоцентрическая экваториальная система координат.**

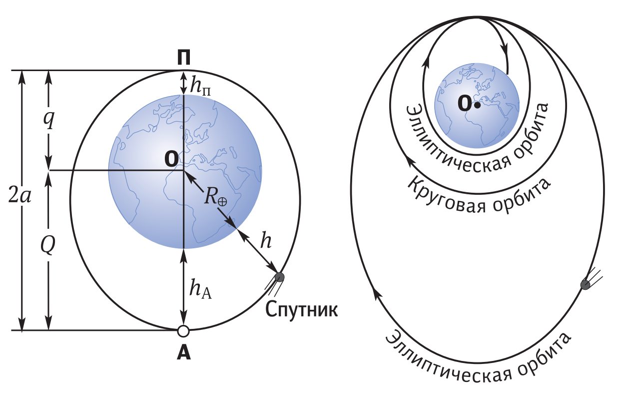



**Рис. 2.14.** **Параметры орбиты искусственного спутника Земли.**

точка старта будет апоцентром (наиболее удаленная от центра точка эллипса). При некоторой скорости мы в конце концов добиваемся, чтобы тело летало по круговой орбите. А если придать еще бóльшую начальную скорость, то оно также полетит по эллипсу, только теперь точка старта станет не апо-, а перицентром.

Кстати, в сообщениях ТАСС и других СМИ вам никогда не скажут, каково расстояние от перицентра или апоцентра орбиты того или иного спутника до центра Земли. У них своя особенность языка, они говорят в других терминах: «высота полета космического тела» — это расстояние от поверхности. На рис. 2.14 показана взаимосвязь этих величин. Но для физика важно знать истинные параметры эллипса — расстояние от центра тяготения, а значит, надо не забывать всегда прибавлять радиус Земли.

А что будет, если еще больше наращивать скорость (рис. 2.15)? При некоторой скорости мы получим параболическое движение: тело при этом отрывается, уходит в бесконечность и там замирает, потому что в пределе на бесконечном расстоянии скорость будет нулевой. А если задать еще бóльшую начальную скорость, то оно улетает по гиперболе и на бесконечности продолжает двигаться, потому что у него есть запас энергии. И, наконец, если мы метнули это тело с бесконечно большой скоростью, то оно уйдет по прямой линии, вообще «не ощущая» гравитации.

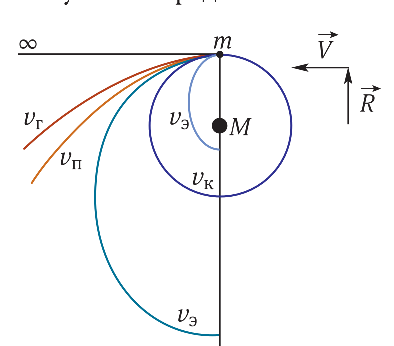



**Рис. 2.15.** **Космические скорости.**

Теперь подсчитаем, с какой скоростью надо запустить тело, чтобы

оно вышло на круговую орбиту. Если тело движется по кругу, то надо приравнять центростремительное ускорение к отношению силы гравитации к массе тела:

$$\frac{mV^2}{R} = \frac{GMm}{R^2}.$$

Из этого уравнения получаем выражение для скорости, которая называется *первой космической* ($V_1$):

$$V_1 = \sqrt{\frac{GM}{R}}.$$

Важно подчеркнуть, что это векторная величина, т. е. эту скорость надо сообщить спутнику обязательно в нужном направлении.

Однако в телерепортаже мы видим, что ракета стартует с космодрома всегда вертикально вверх, а потом говорят, что ракета набрала первую космическую скорость и вышла на круговую орбиту вокруг Земли. Что было бы дальше, если бы она набрала первую космическую в вертикальном направлении? Вышла бы она на круговую орбиту? Конечно, нет — она упала бы обратно.

Кстати, понятие первой космической скорости (называемой также круговой скоростью) $v_1$ определяют не только у поверхности планеты, поэтому всегда надо уточнять — в каком месте. В формулу входит расстояние до центра планеты; подставляйте сюда другие значения — и вы получите разные значения первой космической скорости. У поверхности Земли или на небольшой высоте (150–200 км), где уже почти нет воздуха, она составляет около 8 км/с, но при удалении от Земли уменьшается обратно пропорционально корню из расстояния.

Итак, если мы придали телу первую космическую скорость точно в направлении, перпендикулярном вектору расстояния, то оно выйдет на круговую орбиту (рис. 2.16). Но если вы ошиблись с направлением, то получите вовсе не круг, а эллипс, хотя модуль скорости и был правильным! Это очень большая проблема для инженеров, которые планируют космические запу-

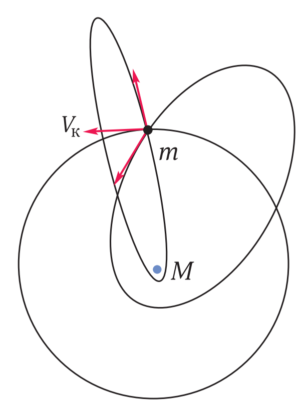



**Рис. 2.16. Зависимость формы орбиты от направления начальной скорости (при модуле, равном круговой скорости).**

ски: малейшее отклонение — и насмарку все труды: спутник может даже войти в атмосферу Земли и сгореть. Обратите внимание, когда запуск космической ракеты долго показывают: сначала она вертикально уходит в стратосферу, а потом постепенно поворачивает, поворачивает, поворачивает — и на высоте 50–70 км начинает двигаться уже параллельно поверхности Земли, и ей надо набрать соответствующую высоте первую космическую скорость, иначе она упадет обратно на планету.

Для тела, равномерно движущегося по круговой орбите, можно легко записать выражения для его кинетической и потенциальной (гравитационной) энергии:

$$E_k = \frac{mV_k^2}{2} = \frac{GMm}{2R}; \quad E_G = -\frac{GMm}{R};$$

$$E_k + E_G = -\frac{GMm}{2R}.$$

Потенциальная энергия отрицательна, потому что это энергия связи двух тел. Полная энергия тела, движущегося с первой космической скоростью, в точности равна кинетической по модулю, но они имеют разные знаки. Мы вывели эту формулу только для кругового движения, но оказывается, что при усреднении по времени она справедлива для движения по эллиптической орбите (при этом нужно заменить $R$ на $a$) и для стационарной системы гравитационно взаимодействующих точек, — это называют *теоремой вириала*. Это очень важная теорема, особенно для тех, кто занимается изучением одновременного движения многих тел — скажем, в звездном скоплении, содержащем миллионы звезд. Просчитать их движение по отдельности невозможно, разве что на суперкомпьютерах. Но даже не зная индивидуальных траекторий и скоростей, мы всегда можем быть уверены, что полная и кинетическая энергии этой кучи звезд равны по модулю.

Раз уж речь зашла о космонавтике, я напоследок расскажу одну интересную вещь о том, каких трудов стоит развить первую космическую скорость. Вот космический корабль, на котором летают наши космонавты (рис. 2.17). Вес его 7 тонн, там сидят три человека — и их надо разогнать до скорости 8 км/с. Так вот, чтобы это сделать, приходится строить космический аппарат для одноразового использования весом более 300 тонн, и вся эта машина — только для того, чтобы маленький космический аппарат достиг устойчивой орбиты. А состо-




**Рис. 2.17.** Соотношение масс ракеты-носителя и ее полезной нагрузки. Ракета весом более 300 тонн создается только для того, чтобы маленький космический аппарат достиг устойчивой орбиты.

ит ракета из металлической конструкции и топлива. Их соотношение такое: сухой вес ракеты — 26 тонн, а залитого в нее топлива — почти 280 тонн. Таким образом, 90% веса ракеты на старте — это ее топливо! Легковой автомобиль, например, весит около 1,5 т, а топлива в его баке около 50 кг, т. е. топливо составляет всего лишь 3% веса автомобиля. При этом ракета не только несет в себе колоссальный объем взрывоопасного вещества, но и работает в гораздо более напряженных условиях, чем автомобиль. Рядом с сотнями тонн ее «взрывчатки» пылает гигантский факел реактивных двигателей. А на вершине этой «бочки с порохом» сидят отважные люди, желающие покинуть планету. И им это, как правило, удается. Одним словом, современная космическая ракета — удивительное творение инженерной мысли.



# 3 Космонавтика

### К антиподам: на спутнике или на метро?

Есть одна интересная задача, которую я традиционно предлагаю на экзамене. Пусть нам требуется послать груз или пассажиров из одной точки Земли в точку, ей противоположную (т. е. к антиподам, потому что с нашей точки зрения все там ходят вверх ногами, притягиваясь к центру Земли). Как это сделать быстрее?

Казалось бы, самый быстрый способ — лететь по круговой орбите спутника. С первой космической скоростью спутник облетает Землю за полтора часа, значит, мы можем прилететь к антиподам через 45 минут плюс время на разгон и торможение. Быстрее не получится: если мы добавим спутнику скорости, он пойдет по дальней орбите и лететь будет дольше. К тому же для реализации этого способа потребуется много денег: надо каждый раз сооружать огромную ракету, тратить очень много энергии на запуск.

А вот представьте себе, что мы просверлили Землю насквозь и без начальной скорости просто отпустили снаряд. Он начнет ускоренно падать к центру Земли, затем, набрав скорость, по инерции пролетит через центр и выпрыгнет как раз в антиподальной точке — останется только его вовремя поймать. Такой канал потребуется сделать только один раз, откачать из него воздух, чтобы не замедлял движение, а потом совершенно бесплатно запускать кабину с людьми на ту сторону земного шара и обратно. Вопрос задачи: какое путешествие займет меньше времени — по низкой околоземной орбите искусственного спутника или через центр Земли?

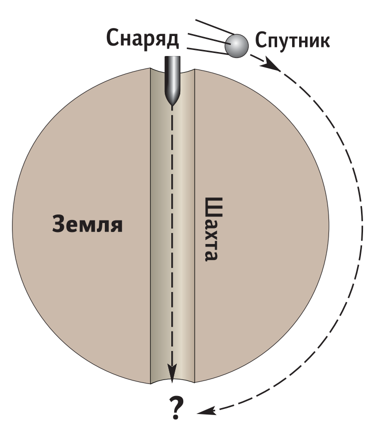



**Рис. 3.1.** Схема «метро» сквозь земной шар.

### Геостационарная орбита и космический лифт

Среди всех круговых орбит особенно интересна геостационарная орбита, на которой орбитальный период длится столько же, сколько оборот Земли вокруг своей оси, т. е. 23 часа 56 минут и примерно 4 секунды. Если вы запустили спутник на круговую орбиту, лежащую в экваториальной плоскости Земли на расстоянии примерно 36 тыс. км от земной поверхности (от центра планеты это будет 42 тыс. км), то, двигаясь в плоскости экватора с периодом в одни звездные сутки, он всегда будет висеть над одной и той же точкой земного шара (рис. 3.2). Таких спутников летают сотни. А зачем они нужны?

Это, например, спутники прямого телевизионного вещания, их специально запустили на геостационарную орбиту, чтобы нам не приходилось в течение суток крутить домашнюю антенну туда-сюда. Мы один раз нацеливаем свою спутниковую «тарелку» на такой спутник и уверены, что он всегда будет в одной и той же точке неба и никуда не денется.

Интересно, что эта особенность геостационарной орбиты открывает нам совершенно фантастические перспективы для космонавтики. С такого спутника можно протянуть на Землю трос, и он не будет наматываться на Землю, потому что спутник относительно земной поверхности не движется. Вдоль этого шнура или каната можно организовать космический лифт. Заметьте: не ракету, которая 98% своей массы выбрасывает, чтобы отправить в полет оставшиеся 2% массы в виде космического корабля, а просто электрический лифт. Прикиньте, сколько в этом случае киловатт-часов электроэнергии потребуется, чтобы подняться в космос: стоить это будет считаные копейки.

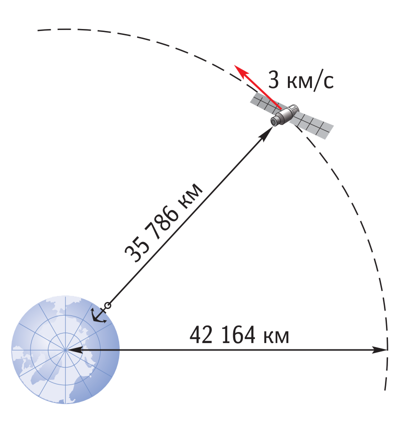



**Рис. 3.2.** Геостационарная орбита. Спутник виден в одной и той же точке неба.

Есть, правда, одна неприятная особенность такого спутника: вот запустили мы его на геостационарную орбиту, протянули канатик, но вдруг какая-то случайная небрежность заставила спутник немного опуститься. Что тогда произойдет? Спутник окажется ближе к центру Земли, его орбитальный период станет короче, т. е. спутник начнет опережать ту точку поверх-

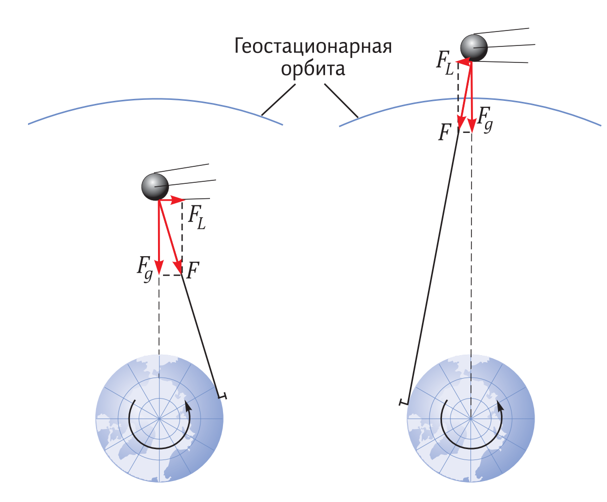



**Рис. 3.3.** Если привязанный к поверхности спутник опустился ниже геостационарной орбиты, то Земля начнет отставать, намотает на себя канат, затормозит спутник еще сильнее, и он упадет. А что случится, если спутник поднимется выше геостационара?

ности, к которой привязан, канат будет наматываться на Землю и тянуть спутник вниз. Тот начнет крутиться еще быстрее — и понятно, что закончится это нехорошо (рис. 3.3). Если привязанный к поверхности спутник опустился ниже геостационарной орбиты, то Земля начнет отставать, намотает на себя канат, затормозит спутник еще сильнее, и он свалится с небес.

А что случится, если спутник поднимется выше геостационара? Если немного подтолкнуть спутник вверх, он начнет отставать от поверхности Земли: чем больше расстояние, тем меньше скорость обращения и тем больше орбитальный период. Но будет ли это движение устойчивым, не станет ли Земля наматывать канат в обратную сторону? Это простая механическая задача, которую должен быть способен решить любой физик. Вычисления показывают такое развитие событий: если привязанный спутник окажется на чуть большей высоте, чем геостационарная орбита, и начнет отставать от

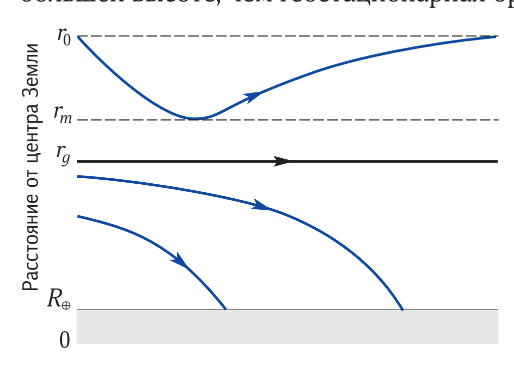



**Рис. 3.4.** Так будет меняться со временем высота привязанного к Земле спутника на орбите, близкой к геостационарной ($r_g$).

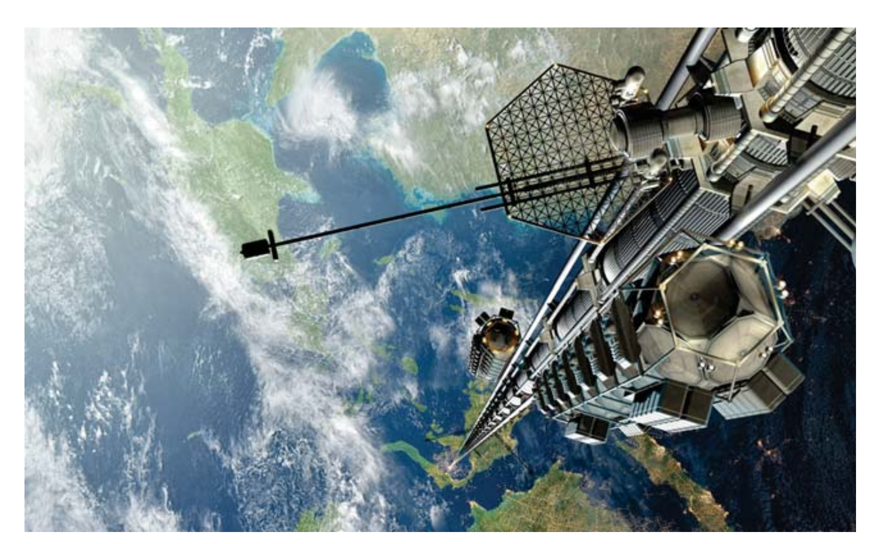


**Рис. 3.5.** Одна из многочисленных художественных иллюстраций, демонстрирующих возможную конструкцию космического лифта.

Земли, она сначала за канатик немного подтянет его вперед, а потом он снова отойдет на исходное расстояние от поверхности. Но после этого спутник уже не отстанет от вращения Земли, потому что наряду с гравитацией добавляется сила, которая тянет его вперед, в сумме они создают более сильное центростремительное ускорение, чем одна только гравитация, и эта более высокая орбита становится геостационарной.

Так что идея космического лифта может быть прекрасно реализована. Осталось только найти материал для каната, чтобы 36-тысячекилометровый трос выдерживал свой вес плюс вес поднимаемого груза (железо для этого не годится, а вот наноуглеродные трубки могут быть перспективными: плотность их меньше, а прочность больше), — и тогда каждому человеку можно будет подняться на геостационарную орбиту за несколько тысяч рублей; по деньгам это все равно что слетать в соседний город на самолете. И это сразу изменит нашу космонавтику.

## К другим мирам

Итак, чтобы оторваться от поверхности Земли и выйти в околоземное пространство, надо набрать первую космическую скорость. Следующая задача космонавтики — улететь от планеты. Для этого необходимо достичь скорости, которая называется второй косми-

ческой (обозначается $V_2$, или $V_P$, или $V_\infty$, или $V_{II}$). Чтобы рассчитать эту величину, используем закон сохранения энергии: кинетическую энергию тела приравниваем к гравитационной энергии его связи с планетой и находим отсюда значение второй космической скорости:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{GMm}{R};$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = \sqrt{2}\,V_1.$$

Как видим, она всего лишь в $\sqrt{2}$ раз больше первой космической, т. е. у поверхности Земли немногим превышает 11 км/с.

Кинетическая энергия — величина скалярная, она не зависит от того, куда направлен вектор скорости, т. е., полетев в любую сторону с такой начальной скоростью, мы покинем планету по параболической траектории.

Если мы уже на околоземной орбите, а нам надо привести корабль на Марс или на более дальнюю планету, мы его просто «пинаем», т. е. добавляем ему такой импульс, чтобы корабль с круговой орбиты Земли вокруг Солнца вышел на эллиптическую орбиту, в апоцентре которой коснулся бы орбиты планеты назначения. Если мы правильно рассчитали время старта, планета приходит в ту же точку одновременно с нашим аппаратом (рис. 3.7). Но встречаются они с разными скоростями: планета движется быстрее, и если ничего не предпринять, то космический корабль тут же отстанет от нее. Значит, надо еще раз включить двигатели и уравнять скорость. Таким образом, надо придать всего два импульса — и вы оказались у соседней планеты. Такая траектория между планетами называется полуэллипсом Гомана—Цандера (по именам инженеров, рассчитавших эту орбиту).

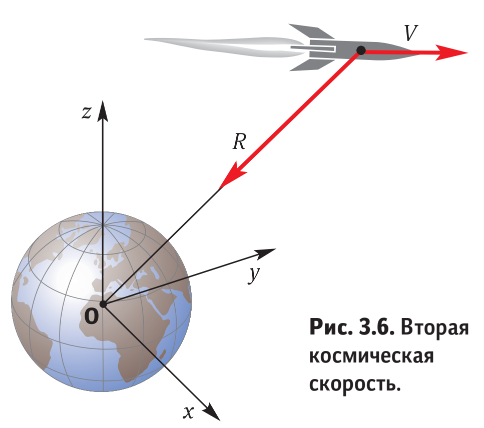


**Рис. 3.6.** Вторая космическая скорость.

Казалось бы, эта простая классическая орбита должна быть энергетически оптимальной, т. е. наилучшей с точки зрения того, как меньше топлива потратить и при этом подальше улететь.

Но — удивительное дело — оказалось, что есть более экономичные орбиты. Открыл их Ари Штернфельд, который увидел, что иногда выгоднее совершить трехимпульсный перелет: сначала улететь дальше той орбиты, куда собираемся попасть, затем еще немного добавить и спуститься к ней и потом уже уравнять скорость (рис. 3.8). Траектория, несомненно, более сложная. Но в сумме эти три импульса (а значит, и затраты топлива) иногда оказываются меньше, чем те два для простой полуэллиптической орбиты. Орбиты Штернфельда лучше, чем полуэллипсы Гомана—Цандера, лишь при большом отношении радиусов орбит планет старта и цели. Для большинства межпланетных перелетов в Солнечной системе они не годятся, но оказываются экономичными для полетов на Луну с околоземной орбиты и для «падения» с земной орбиты в околосолнечную область. Это удивительное открытие в небесной механике Штернфельд сделал, сидя у себя дома: это вообще был очень интересный человек и гениальный космический инженер.

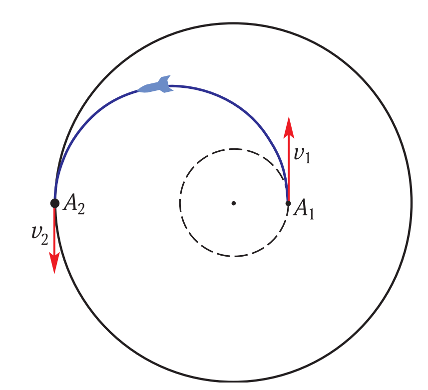



**Рис. 3.7.** Полуэллипс Гомана—Цандера. Показаны точки приложения импульсов.

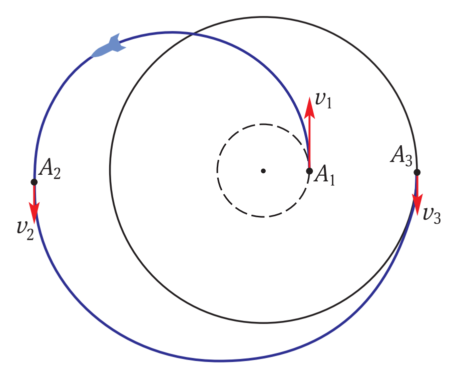



**Рис. 3.8.** Траектория перелета Штернфельда. Чтобы долететь с земной орбиты до орбиты вокруг дальней планеты, достаточно в нужные моменты сообщить кораблю три правильных импульса.

### Орбиты спутников

Рассуждения об эллиптической орбите спутников хороши, но природа на самом деле устроена сложнее: та же Земля — не идеальный шар, а сплюснутый, т. е. эллипсоид вращения. Из-за этого сила гравитации вблизи Земли обратно пропорциональна отнюдь не $r^2$, а более сложной зависимости от $r$. Значит, если мы запустили спутник на полярную орбиту (проходящую над Южным и Северным по-

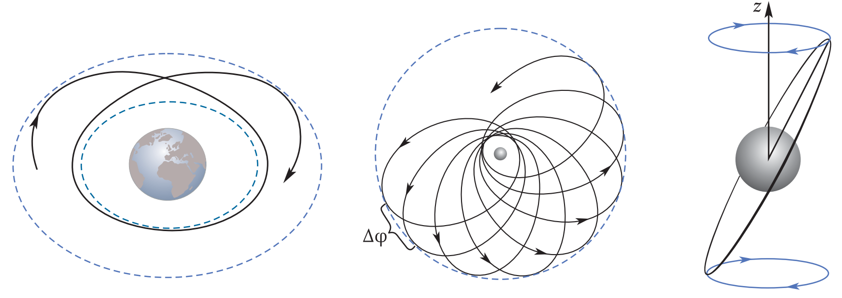



**Рис. 3.9.** **Из-за сплюснутой формы Земли полярная орбита спутника отличается от эллиптической.**

люсами), то в таком силовом поле, как мы уже видели в предыдущей лекции, эллипс орбиты постепенно поворачивается: происходит прецессия его оси вокруг центра тяготения (рис. 3.9).

Если орбитальная плоскость расположена под косым углом к экваториальной плоскости Земли, то реальные траектории спутников получаются намного более сложными. Россия обычно запускает спутники на орбиту со средним наклоном к экватору около 60° (например, спутник телевизионного вещания «Молния»). При этом сама орбитальная плоскость тоже прецессирует, т. е. поворачивается

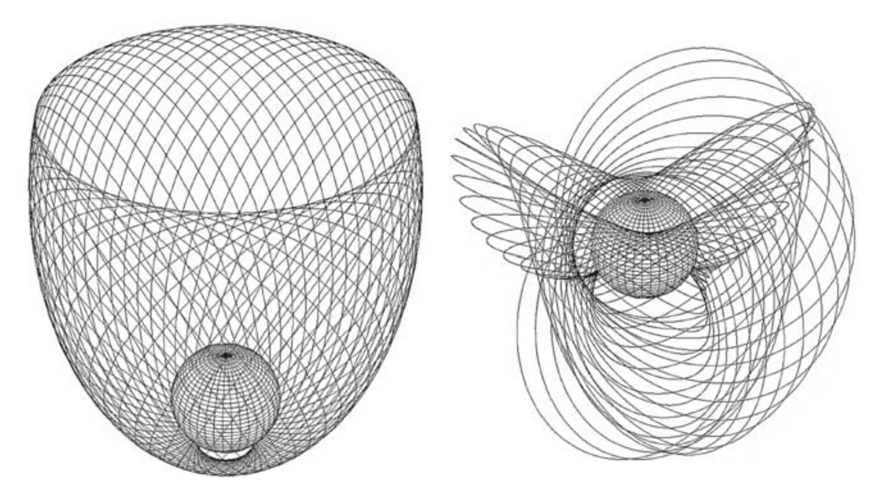


**Рис. 3.10.** ***Слева*** **— орбита ИСЗ «Молния» (спутник связи). Наклон плоскости орбиты к экватору — около 63°. При таком наклоне отсутствует поворот линии апсид, поэтому спутник на высокоэллиптической орбите всегда «висит» над одним полушарием Земли (в данном случае — над северным). Орбитальная плоскость поворачивается вокруг полярной оси.** ***Справа*** **— орбита типичного ИСЗ. Расстояния между витками на рисунках увеличены для наглядности.**

вокруг земной оси. Для точного расчета их орбиты приходится отказываться от теорем Ньютона и все время учитывать неидеальную форму планеты.

### Движение двойных звезд

Законы небесной механики описывают движение не только планет и их спутников. Задача двух тел также может быть применена к двойным звездам, которых на небе очень много, больше, чем одиночных. Солнце среди них является скорее исключением. Ближайшая к нам звезда, Альфа Кентавра, тоже двойная.

Наблюдая двойную звезду (рис. 3.11) в течение 12 лет: 1908, 1915, 1920 гг., — мы видим, как происходит орбитальное обращение: оба компонента движутся относительно друг друга.

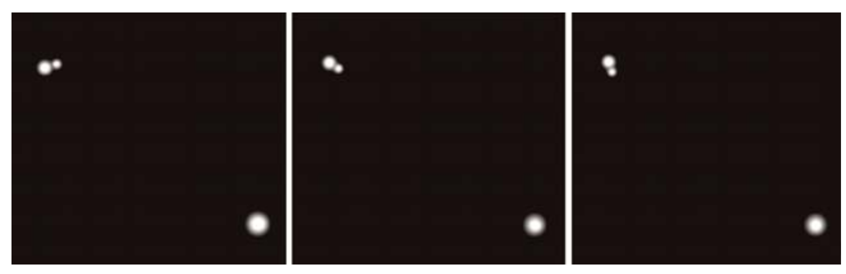


**Рис. 3.11.** Изменение взаимного расположения компонентов двойной звезды Крюгер 60 (вверху слева) с 1908 по 1920 гг. Фото: Йеркская обсерватория, США.

Астрономы всегда измеряют положения близких друг к другу звезд не в какой-то единой системе координат, а просто друг относительно друга — так получается проще и точнее. Навели телескоп на одну звезду, более яркую, теперь она у нас всегда в центре отсчета (в начале координат), а вторая кружится по орбите (рис. 3.12). Но на самом-то деле они обе «бегают» вокруг общего центра масс, который невидим и поэтому навестись на него невозможно. Значит, нам надо модифицировать уравнения небесной механики, из инерциальной системы отсчета перевести в неинерциальную, связанную с одним массивным компонентом. Взяли выражения для векторов обеих скоростей и нашли их разницу, т. е. относительную скорость, — и оказалось, что она точно так же зависит от всех параметров, как и в зако-

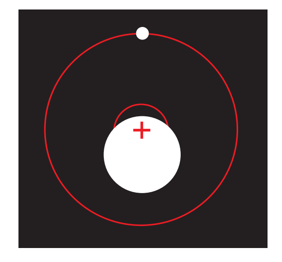


**Рис. 3.12.** Движение компонентов двойной звезды; невидимый центр масс отмечен крестом.

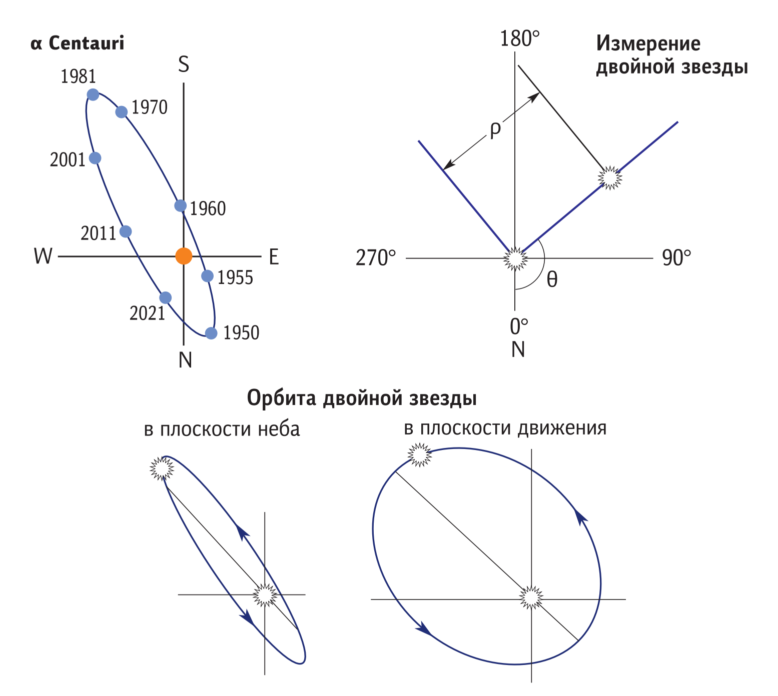



**Рис. 3.13. Характеристики движения двойных звезд. θ — позиционный угол; ρ — разделение (расстояние). Вверху слева — относительная орбита одной из звезд двойной системы Альфа Кентавра в системе отсчёта другой звезды.**

не Ньютона: обратно пропорциональна квадрату расстояния, только теперь в качестве параметра массы фигурирует сумма масс этих двух объектов:

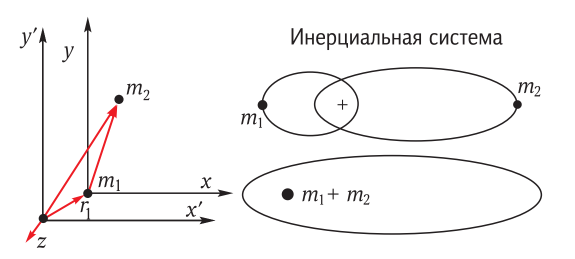
$$m_1 \frac{d\boldsymbol{V_1}}{dt} \equiv \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \cdot \frac{\boldsymbol{r}}{r} \quad \text{и} \quad m_2 \frac{d\boldsymbol{V_2}}{dt} \equiv \frac{Gm_1 m_2}{r^2} \cdot \frac{\boldsymbol{r}}{r};$$

$$\frac{d(\boldsymbol{V_2} - \boldsymbol{V_1})}{dt} = -\frac{G(m_1 + m_2)}{r^3} \boldsymbol{r};$$

$$\frac{d\boldsymbol{V}}{dt} = \frac{GM}{r^3} r.$$

Таким образом, при переносе системы координат в одно из тел гравитационно связанной пары все законы небесной механики сохраняются и прекрасно работают, но только при допущении, что в этом теле сосредоточена суммарная масса обоих тел, и именно эту суммарную величину мы из наблюдений можем рассчитать по форме

**Рис. 3.14.** **Движение тела $m_2$ относительно $m_1$ в неинерциальной системе отсчета происходит так же, как в инерциальной, при условии, что поле создает неподвижное тело $M = m_1 + m_2$.**




относительной орбиты. Это не очень удобно: хотелось бы «взвесить» каждое из тел пары отдельно от другого. Редко, но иногда это можно сделать, если удается проследить, как каждое из них выписывает свою траекторию на небе. Например, известная звезда Сириус — тоже двойная, у нее есть яркий компонент (Сириус А) и тусклый спутник (Сириус В). Астрономы отследили на небе их траектории относительно центра масс, который движется практически по прямой. По соотношению расстояний звезд от центра масс нетрудно вычислить, что меньший компонент Сириуса вдвое легче более массивного.

Вот еще интересная проблема для размышления и хорошая задачка для физиков: представим, что в Солнечной системе вдруг пропал центральный объект, Солнце. Убежать оно, конечно, не может,

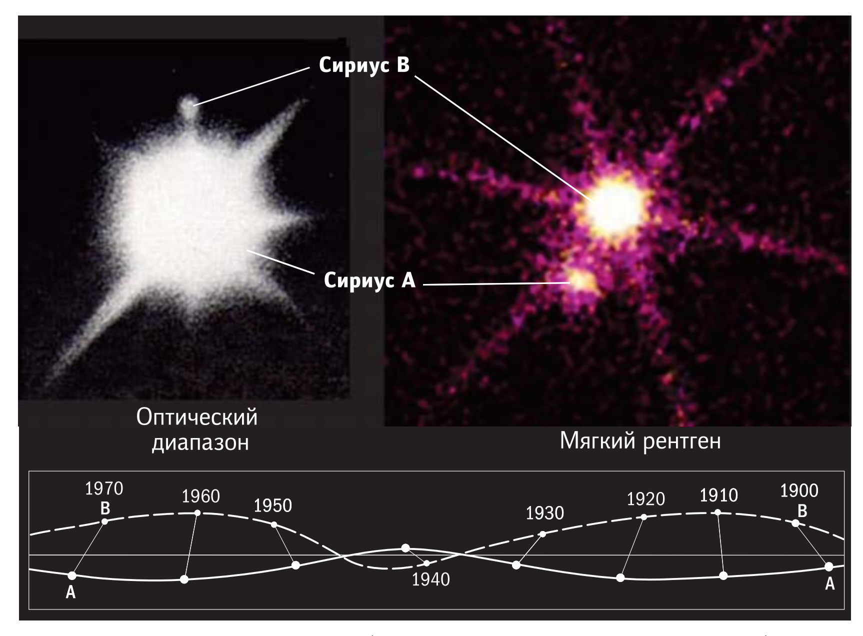
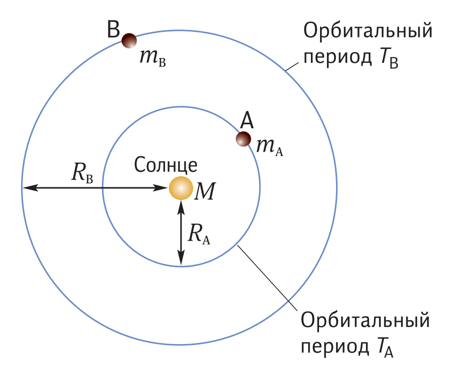



**Рис. 3.15.** **Траектории движения обоих компонентов звезды Сириус на небосклоне.**




**Третий закон Кеплера**
*(гармонический)*

$$\frac{T_A^2}{T_B^2} = \frac{R_A^3}{R_B^3}$$

**Третий закон Кеплера**
*(уточненный Ньютоном)*

$$\frac{T_A^2}{T_B^2} \cdot \frac{M+m_A}{M+m_B} = \frac{R_A^3}{R_B^3}$$

**Рис. 3.16. Третий закон Кеплера связывает относительный орбитальный период обращения планет с относительным расстоянием до центра притяжения.**

поэтому предположим, что оно взорвалось (вообще-то взрыв Солнца маловероятен, но отнюдь не исключен) и моментально раскидало свою массу во все стороны далеко-далеко. Вопрос: а сохранится ли Солнечная система? Или планеты разлетятся на все четыре стороны?

### Небесная троица

До этого мы говорили только про два взаимодействующих тела, а теперь перешли к более сложной проблеме: три тела. Ну и, казалось бы, что тут такого особенного, что может измениться? Но небесные механики несколько столетий работали над тем, чтобы создать аналитическую теорию движения трех тел… Работали-работали — и доказали, что это невозможно. Аналитическая теория — это комплекс уравнений, в которые вы подставляете свои параметры и момент времени, какой вас интересует, и вычисления по ним выдают вам координаты, где ваши тела находятся и с какими скоростями они движутся.

Но нашелся человек, Карл Зундман, который создал-таки эту теорию. Казалось бы, ура — Нобелевскую премию ему надо дать! Однако не дали, и вот почему. Он записал эти уравнения в виде бесконечных рядов, которые сходятся так медленно, что для того, чтобы рассчитать положения Луны, Земли и Солнца хотя бы на год вперед, надо просуммировать $10^{8000000}$ членов. Представьте, что это за фантастическое число: всем компьютерам мира не под силу обработать такое количество данных, потому что в доступной нашему наблюдению Вселенной примерно $10^{88}$ протонов, а здесь в показателе сте-

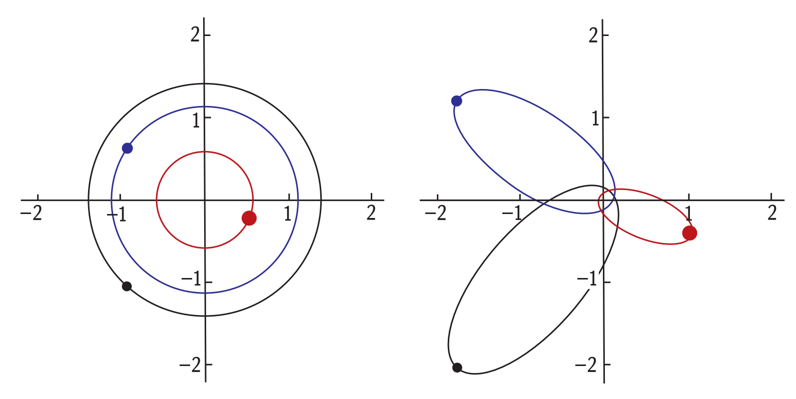



**Рис. 3.17.** Существуют стационарные орбиты, по которым три тела разной массы могут двигаться бесконечно долго вокруг общего центра масс.

пени миллионы! Так что хоть теория и есть, пользоваться ею совершенно невозможно.

Вообще-то можно найти конфигурации из трех тел, эволюцию которых можно предсказать: например, создать искусственно троицу, которая совершает периодическое движение (рис. 3.17, 3.18). И тогда посмотрел на один период — и потом копируй его на бесконечное количество последующих периодов. Недавно придумали очень изящную конфигурацию из трех тел одинаковой массы, которые будут летать друг за другом по «восьмерке» (рис. 3.18). Формально во всех этих случаях тела будут бесконечно долго повторять свой циклический путь, но движение это очень неустойчиво: стоит чуть-чуть, на мизерную величину, его нарушить — и система начнет раз-

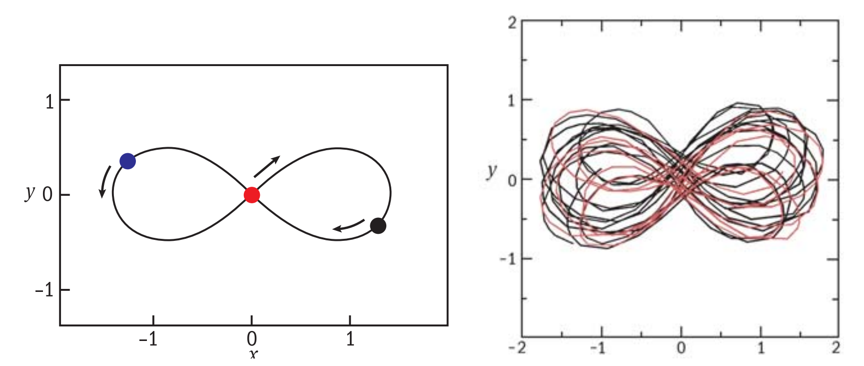
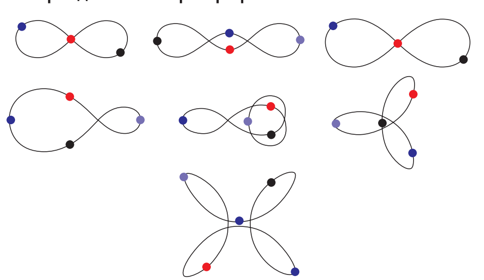



**Рис. 3.18.** Движение трех тел одинаковой массы по единой «хореографической» орбите (слева). Но это движение неустойчиво, что демонстрирует результат численного расчета (справа).

Периодические хореографические системы $N$ тел



Периодические нехореографические системы $N$ тел

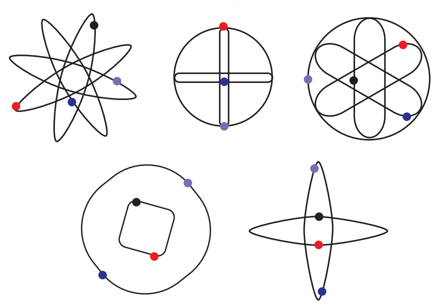


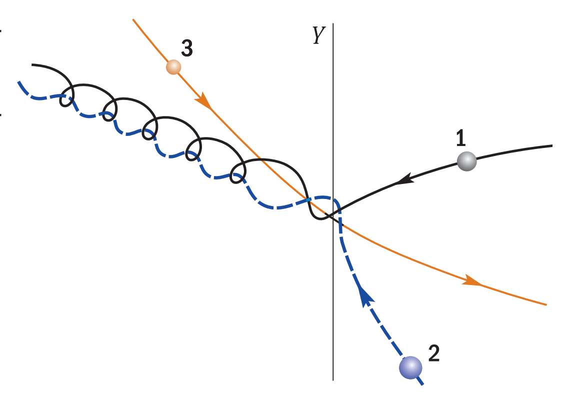
**Рис. 3.19.** **Периодическое движение тел количеством больше двух (Alain Chenciner, 2007). Движение системы трех и более тел сравнимой массы в собственном гравитационном поле всегда неустойчиво: малейшее возмущение приводит к неограниченному разбалтыванию системы.**

балтываться и придет к хаотическому состянию. Даже ошибки компьютерного счета приводят к тому, что траектории начинают расходиться и через несколько периодов обращения система рассыпается. А устойчивого периодического движения тел, количество которых больше двух, не бывает.

В общем случае реализуется такая ситуация: берем три массивных тела и отпускаем навстречу друг другу. Сближаясь, они, естественно, сильнее притягиваются друг к другу и в небольшой окрестности бурно взаимодействуют. В большинстве случаев при этом два тела объединяются в двойную систему и начинают летать по стабильным эллиптическим орбитам бесконечно долго, а третье тело уносит избыток энергии: два тела связались, а потенциальная энергия связи перешла в виде кинетической к третьему телу, которое, как из пушки, вылетает из системы (рис. 3.20). Это обычный результат гравитационного взаимодействия трех тел.

Хотя все системы из трех тел рано или поздно распадаются, время их жизни очень сильно зависит от начальной конфигурации. Например, если два тела образуют тесную двойную систему, а третье обращается на большом расстоянии от них, то оно «воспринимает» двойную систему практически как точечную массу и движется весь-

**Рис. 3.20** **Если встречаются вместе три тела, то лишь два из них могут образовать устойчивую систему, передав энергию своей связи третьему.**




ма устойчиво почти по кеплеровской орбите. В свою очередь, на движение тел в тесной двойной системе наличие далекого третьего тела почти не влияет. Тройные и более сложные системы такого типа называют *иерархическими*, в отличие от *хаотических* систем, в которых расстояния между всеми компонентами одного порядка. При сравнимой массе тел переход к иерархическому строению происходит, когда характерное расстояние между компонентами соседних уровней различается в 5÷10 раз. Пример четырехкратной иерархической системы дает Эпсилон Лиры, в которой четыре звезды объединены в две тесные системы, обращающиеся вокруг общего центра масс.

Почему задача трех тел очень важна? Это задача жизненная: с Земли продолжают запускать космические аппараты на Луну (например, фотографировать обратную сторону Луны), и надо рассчитывать траекторию полета такого космического аппарата. Решают

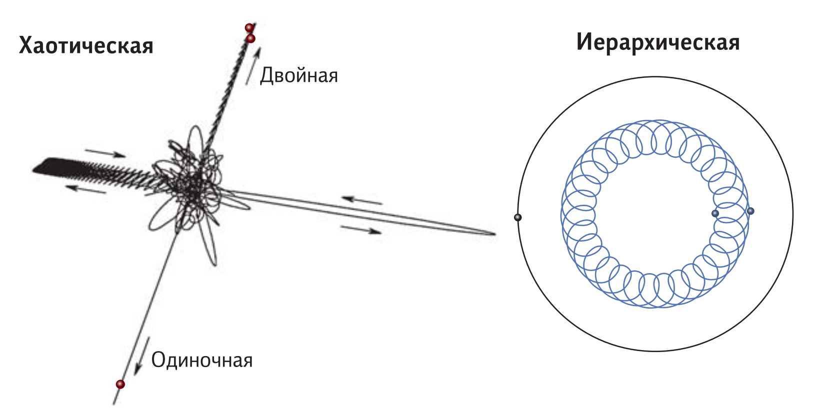



**Рис. 3.21.** **Тройные системы: хаотическая и иерархическая (условно устойчивая).**

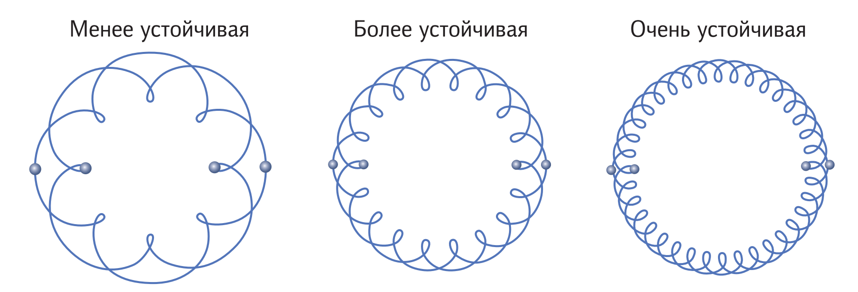



**Рис. 3.22.** **Иерархические четырехкратные системы разной степени устойчивости.**

ее только численно, на компьютерах, шаг за шагом. Правда, очень часто можно сделать упрощающие предположения. Например, разумно предположить, что среди этих трех тел только два массивные, а третье по сравнению с ними невесомое, т. е. они его притягивают, а оно на них не влияет. Второе упрощение: пусть все они движутся в одной плоскости, то есть легкое тело летает в орбитальной плоскости первых двух. Третье упрощение: пусть массивные тела относительно своего центра массы движутся по круговым орбитам. И вот

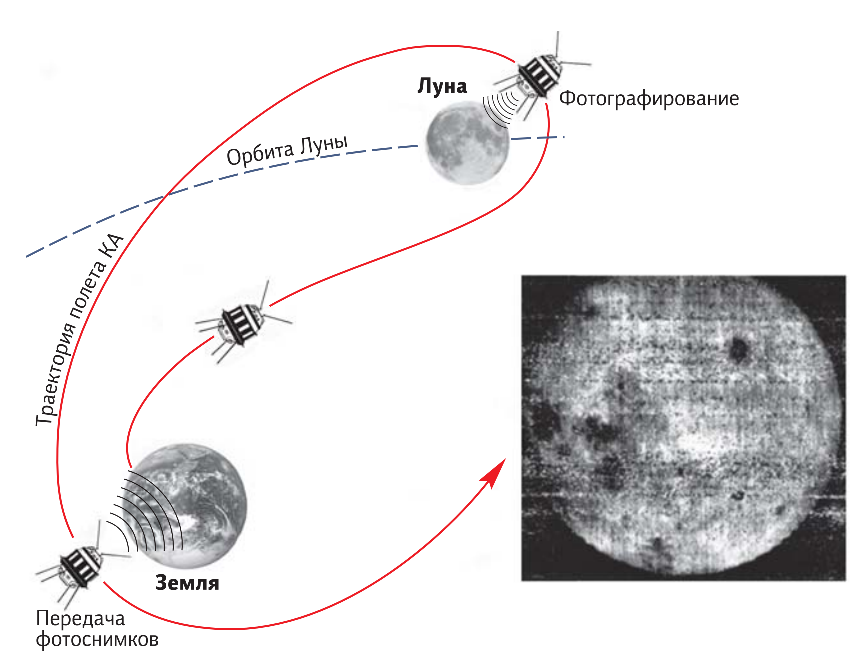



**Рис. 3.23.** **В задачи космического аппарата «Луна-3» входило фотографирование Луны с орбиты и последующая передача фотоснимков на Землю.**

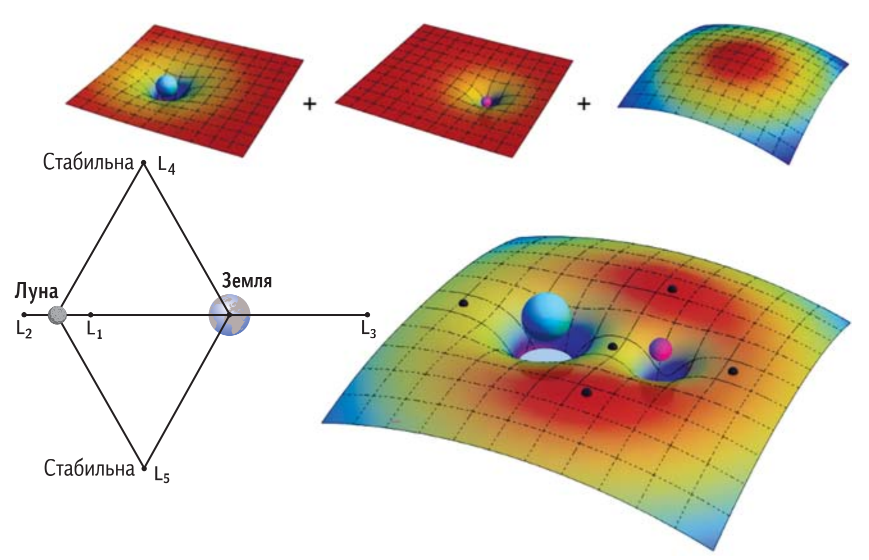



**Рис. 3.24.** Пять точек Лагранжа в системе «Земля–Луна».

когда мы принимаем во внимание все эти упрощения, получается задача, которую уже можно решать аналитически; она называется ограниченной круговой задачей трех тел. Тогда можно перейти в систему координат, связанную с вращением двух массивных тел, чтобы они в этой системе оставались на месте, а вся остальная Вселенная крутилась вокруг них.

Но если вращается система координат, то в ней появляются центробежная и кориолисова силы, их надо ввести в эту систему соответствующими слагаемыми в уравнениях. И оказывается, что в такой системе есть 5 точек, где третье – легкое – тело может оставаться неподвижным относительно двух массивных (это означает, что в обычной системе координат оно будет обращаться вокруг центра масс синхронно с ними). Три из этих точек – на соединяющей массивные тела линии – обнаружил еще Эйлер, а две другие – при вершинах равносторонних треугольников – Лагранж, но все их называют точками Лагранжа и обозначают буквой L (рис. 3.24).

Если нанести на плоскость линии равного потенциала (гравитационного плюс центробежного), то на такой картине мы сразу увидим области контроля гравитации одного и другого тела, область их совместного «контроля», а также области всех пяти точек Лагранжа. Лучше смотреть на это в объемном эскизе: для этого надо построить эквипотенциальную поверхность, в которой будет две гравита-

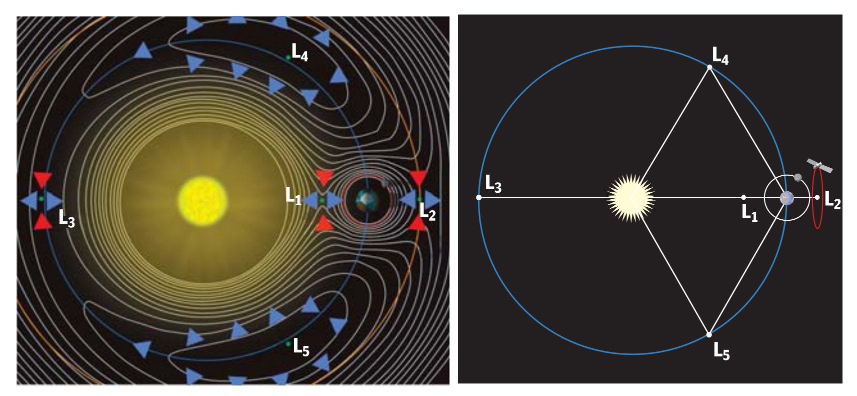



**Рис. 3.25.** Направления действующих сил в окрестности точек Лагранжа системы Солнце—Земля. Во второй точке Эйлера—Лагранжа космический аппарат постоянно виден с ночного полушария Земли.

ционные ямы, вокруг которых центробежный потенциал дает скат по всем направлениям, потому что если вы отдалились от массивных тел, то центробежная сила выкинет вас из этой системы. Точки Лагранжа — это точки равновесия, но оно не всегда устойчиво. В линейных точках $L_1$, $L_2$ и $L_3$ оно вообще неустойчиво: чуть отклонился — и уже не вернешься. А в окрестности треугольных точек $L_4$ и $L_5$ слабая устойчивость есть лишь при большом отношении масс двух главных объектов — не менее 25 : 1.

Тем не менее в природе, да и в технике тоже, все пять точек Лагранжа довольно часто играют большую роль. Луна движется

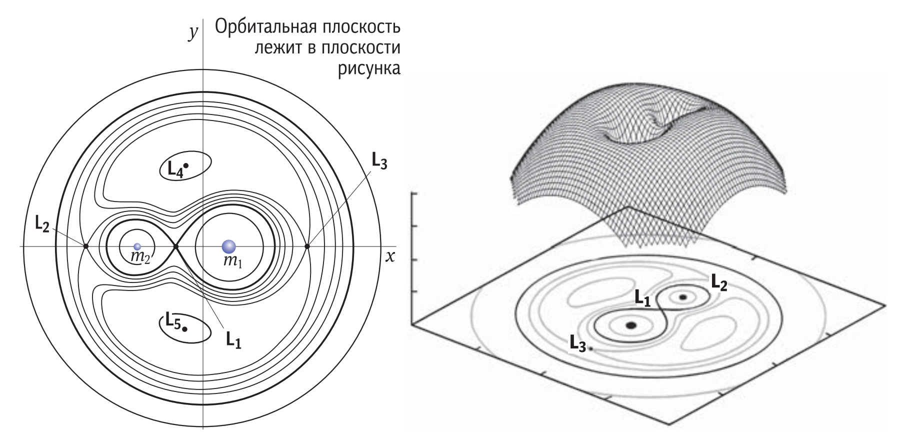



**Рис. 3.26.** Поверхности нулевой скорости (эквипотенциальные) в плоской круговой ограниченной ($m_3 \ll m_1$ и $m_2$) задаче трех тел.

внутри области гравитационного контроля Земли, но не очень далеко от пограничной линии (рис. 3.26), так что устойчивость Луны не слишком велика, она не очень сильно привязана к Земле. С другой стороны, космические аппараты часто запускают в разные точки Лагранжа, потому что там очень удобно «подвесить» аппарат. Так, в точке $L_1$ он будет всегда смотреть на Солнце, а антенна для связи с Землей при этом постоянно будет направлена на Землю, в точке $L_4$ он одновременно будет видеть и Солнце, и Землю с Луной и в то же время находиться подальше от них, т. е. разные точки играют разную роль. Точка $L_3$ — единственная, которая пока не используется, хотя она очень интересна: если туда поместить спутник, то он будет наблюдать ту полусферу Солнца, которую с Земли не видно. Но как с ним связываться? Радиосигнал сквозь Солнце не проходит, поэтому надо будет запускать еще и отдельный ретранслятор.

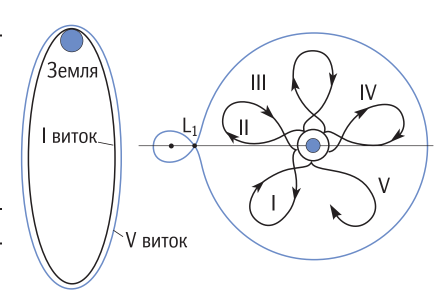



**Рис. 3.27. Траектория космического аппарата в неинерциальной системе отсчета, в которой два массивных небесных тела неподвижны.**

Эквипотенциальная поверхность системы двух массивных тел, проходящая через точку $L_1$, ограничивает две области пространства, контролируемые соответствующим центром притяжения. Их называют *полостями Роша*, по имени французского математика, который выполнил расчеты. Если легкое тело приближается к окрестности этой точки, то оно будет двигаться по довольно замысловатой траектории (рис. 3.27). Например, мы запустили спутник к Луне, он перескакивает в область контроля Луны, делает там несколько пируэтов, а затем снова оказывается спутником Земли. Но за границы эквипотенциальной поверхности он выйти не может, потому что энергии ему для этого не хватает, он заперт в совместном гравитационном поле двух тел.

В нашей планетной системе два самых массивных тела — Солнце и Юпитер. В точках Лангранжа этой пары реализовалась интересная ситуация: в них скопилось очень много астероидов. Попадая в эту область относительной устойчивости, астероиды остаются там надолго, на миллионы лет, а уходят оттуда очень медленно, поэтому их концентрация там весьма высока. Эти две группы астероидов пос-

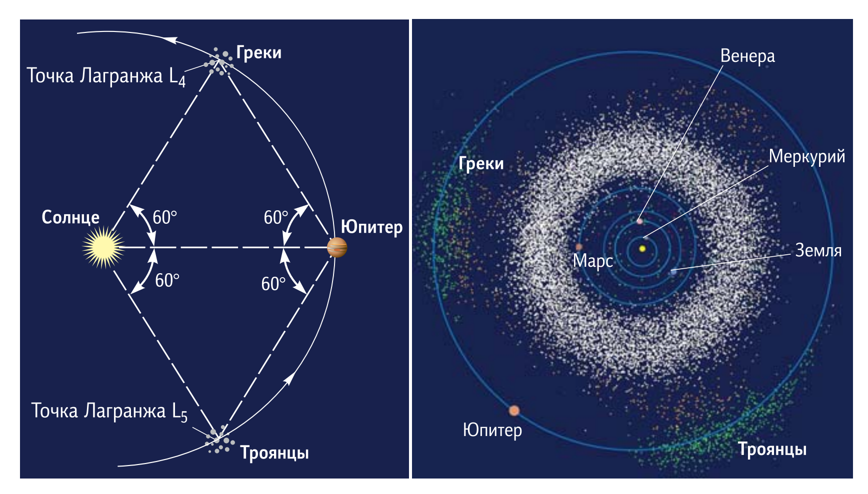



**Рис. 3.28.** Впереди и позади Юпитера по его орбите летят астероиды, накопившиеся в окрестности точек Лагранжа $L_4$ и $L_5$.

тоянно сопровождают Юпитер на его орбите, доказывая, что Лагранж правильно сделал свои вычисления: одна группа (условно названная «Греки») движется на 60° впереди Юпитера, другая («Троянцы») — на 60° позади него, и в каждой по нескольку тысяч астероидов (рис. 3.28).

### Гравитационная праща

Есть еще одна важная вещь, связанная с задачей трех тел: гравитационный маневр, который часто используют для доразгона космических аппаратов. Например, чтобы забросить зонд к дальним планетам — Нептуну, Урану, Плутону и дальше, — используют гравитационное притяжение встречающейся по пути планеты. В принципе идея та же, что и в обычной механике: если вы катнете маленький мячик навстречу катящемуся тяжелому, при отскоке скорость маленького увеличится — это следствие закона сохранения импульса. То же самое случается, когда планета летит вперед, а зонд, приближаясь к ней, облетает ее и при этом приобретает дополнительный импульс. Чтобы осознать причину этого, можно рассуждать так: находясь на этой планете, мы увидим, что зонд приближается к нам на большой относительной скорости (равной сумме скоростей планеты и зонда), потом он разворачивает свой вектор скорости и удаляется с таким же модулем относительной скорости. Но в неподвижной системе координат получается, что скорость планеты добавилась к нему два раза: сначала на встречном курсе, потом на уходящем.

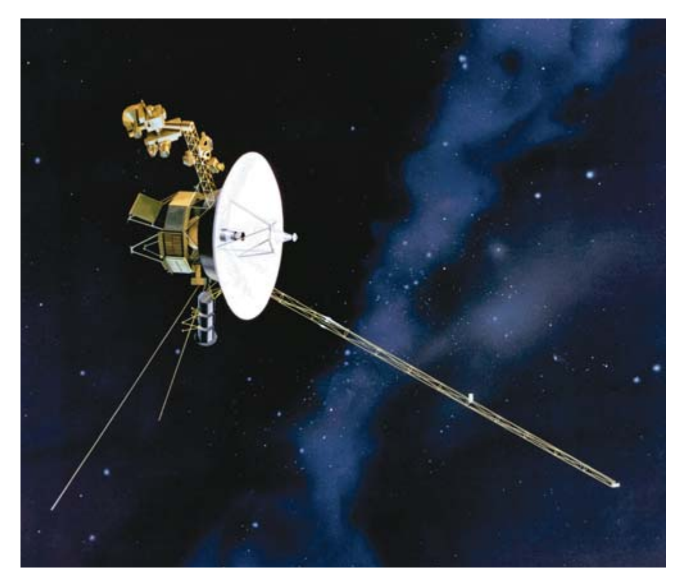


**Рис. 3.29.** Космические аппараты «Вояджер». Рисунок: NASA.

Значит, при разумном планировании траектории можно увеличить скорость зонда в пределе на удвоенную орбитальную скорость планеты, хотя удается такое редко. Так, в 1977 г. запустили два космических аппарата, «Вояджер-1» и «Вояджер-2», — очень красивый был эксперимент. Оба зонда облетели Юпитер и Сатурн, получив от этих планет такие толчки (и, кстати, подходящие направления скорости), что и тот и другой вылетели из Солнечной системы. Ракета их так разогнать не могла, именно влияние Юпитера и Сатурна позволило одному сразу покинуть Солнечную систему, а другому по пути еще посетить Уран и Нептун (рис. 3.30). Вот такой грандиозный тур они совершили — а все благодаря точному расчету траектории полета. Кстати, первый зонд запустили без надежды на точный расчет, он посетил только Юпитер и Сатурн, но к Урану и Нептуну не попал. А со вторым уже стало ясно, что можно рискнуть, просто его надо было круче завернуть. Чтобы сильнее повернуть вектор скорости, надо пролететь ближе к планете (чем больше рискуешь, приближаясь на опасное расстояние к планете, тем больше прибавка в скорости при удачном гравитационном маневре). И чтобы она сильнее притягивала, куда, вы думаете, его запустили? Его направили в щель между внутренним кольцом Сатурна и поверхностью планеты. Тогда еще не знали, что это место тоже заполнено веществом, думали, что там пустота. А теперь мы понимаем, что риск был огромный: он там

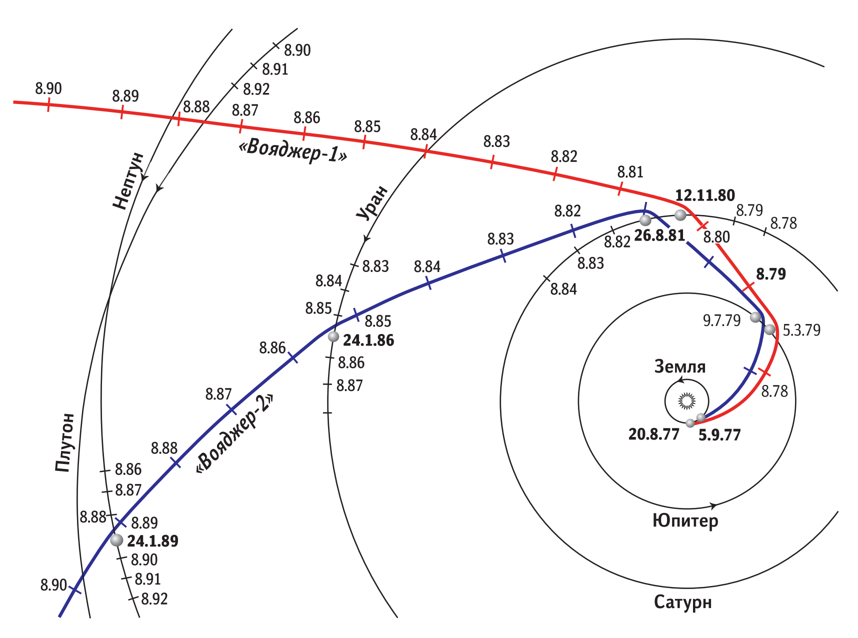



**Рис. 3.30.** Траектории аппаратов «Вояджер-1» и «Вояджер-2» в Солнечной системе с отметками дат.

запросто мог обо что-нибудь стукнуться. Но зонду повезло, он беспрепятственно проскочил в эту щель, под действием планеты разогнался, сильно повернул — и дальше полетел куда надо.

### Траектория Луны

Обычно в учебниках говорится: Луна обращается вокруг Земли, а Земля — вокруг Солнца, поэтому траектория Луны вдоль орбиты Земли выглядит так — и рисуют циклоиду. Начинающий астроном именно так изобразил бы траекторию Луны, как она ходит вокруг Земли и наворачивает петельки (рис. 3.31, 3.32). Но на самом деле это неверно, и мы можем легко опровергнуть подобную картину, сделав простой расчет.

Для физиков не должно быть сомнений в том, что траектория любого тела всегда вогнута туда, куда его тянет равнодействующая (суммарный вектор) всех сил. Давайте проверим, что сильнее притягивает Луну — Земля или Солнце. Это очень просто: сравниваем две гравитационные силы, они равны отношению массы к квадрату расстояния (см. предыдущую лекцию). Луна примерно в 390 раз ближе к Земле, чем к Солнцу. А отношение масс Земли и Солнца — около $3 \cdot 10^{-6}$, т. е.

Земля в 333 тыс. раз легче Солнца. Подставляем в формулу — и получаем, что сила притяжения Луны к Солнцу вдвое больше, чем к Земле. Факт неожиданный: ведь если Солнце притягивает сильнее, чем Земля, то Луна должна быть спутником Солнца, а не Земли, разве не так? Отчего же тогда она «бегает» вокруг нас, если Солнце ее притягивает вдвое сильнее? С этим надо разобраться.

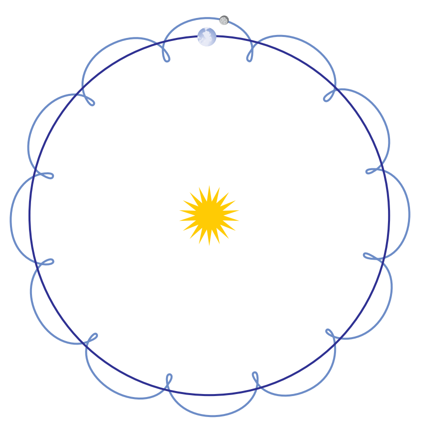


**Рис. 3.31.** **На первый взгляд, так должна выглядеть траектория Луны, но это неправильно.**

Если мы построим график движения Земли и Луны в реальном масштабе, то увидим, что знак кривизны траектории Луны никогда не меняется: кривая всегда вогнута внутрь, поскольку равнодействующая сила всегда направлена внутрь орбиты, т. е. в сторону Солнца. Почему же Луна не отрывается от Земли и не становится спутником Солнца? Да потому, что и Земля, и Луна притягиваются Солнцем почти одинаково, но чтобы оно было способно оторвать Луну от Земли, нужно, чтобы разница между ускорениями Земли и Луны к Солнцу была больше, чем ускорение Луны к Земле. Вот если бы радиус лунной орбиты был, скажем, всего лишь вчетверо меньше, чем радиус орбиты Земли, то Луна действительно выписывала бы «школьные» пируэты. А когда мы начинаем увеличивать размеры земной орбиты, удалять Солнце, приближая отношение параметров к истинным, дело постепенно приходит к тому, что орбиты Луны и Земли становятся практически неразличимыми — обе они спутники Солнца. И лишь потому, что они находятся близко друг к другу, Земля не отпускает от себя

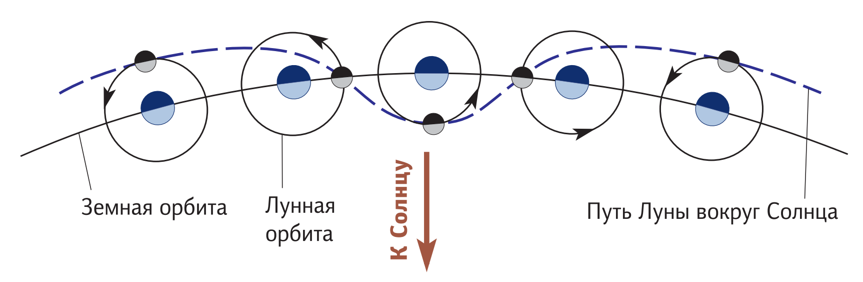



**Рис. 3.32.** **Траектория Луны, как ее часто неверно изображают.**

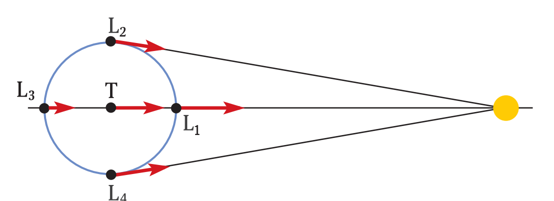



**Рис. 3.33.** Вомущающее влияние Солнца на орбитальное движение Луны. Луну сильнее притягивает Солнце, чем Земля.

Луну; обе эти планеты (Луна — тоже планета, точнее, планета-спутник) практически одинаково «падают» на Солнце, т. е. почти с одинаковым ускорением движутся относительно Солнца, а разница этих ускорений так мала, что Земля способна контролировать положение Луны рядом с собой:

$$\frac{R_{\odot}}{R_{☾}} = 390;$$

$$\frac{F_{\odot}}{F_{\oplus}} = \frac{M_{\oplus} R^2_{\odot☾}}{R^2_{\odot☾} M_{\oplus}} = \frac{333\,000}{390^2} = 2{,}2\ldots$$

В заключение рассказа хочу посоветовать вам книги для дополнительного чтения. Самые простые для понимания — это «Парадоксы космонавтики» вышеупомянутого А. А. Штернфельда и «Цели и пути покорения космоса» Р. Г. Перельмана (не Якова Исидоровича, который написал «Занимательную физику», и не Григория Яковлевича — знаменитого математика, а другого Перельмана, Романа Григорьевича, инженера). Следующая пара книг — уже с математическими формулами: это «Механика космического полета» В. И. Левантовского и «Основы космонавтики» М. Фертрегта. Далее идут серьезные справочники по небесной механике — «Введение в астронавтику» Г. Руппе и «Космонавтика» Е. В. Тарасова. И, наконец, вышедший в двух издани-

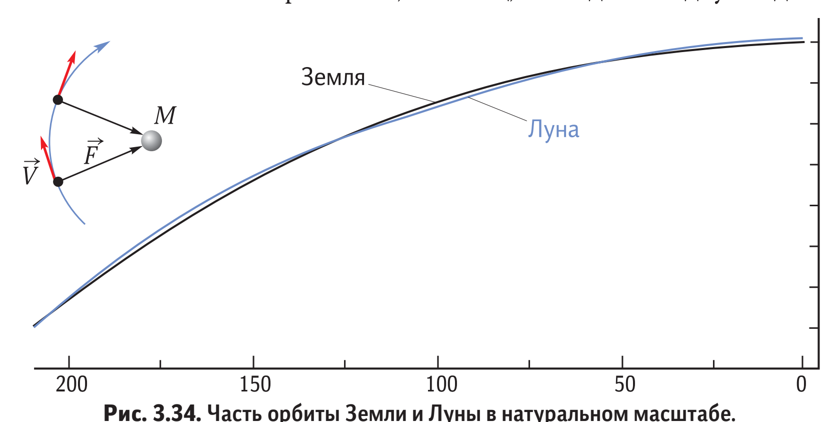



**Рис. 3.34.** Часть орбиты Земли и Луны в натуральном масштабе.

ях бестселлер «Очерки о движении космических тел», автор которого, Владимир Васильевич Белецкий, — совершенно удивительный человек и фантастический лектор. Он абсолютно глухой, но, впервые побывав на его лекции, я об этом даже не догадался, настолько хорошо он рассказывал. И книгу написал потрясающую — ни о какой более захватывающей про небесную механику мне не известно.



# 4 Планеты земной группы

Внутренняя область Солнечной системы населена разнообразными телами: крупными планетами, их спутниками, а также малыми телами — астероидами и кометами. С 2006 г. в группе планет введена новая подгруппа — планеты-карлики (*dwarf planet*), обладающие внутренними качествами планет (сфероидальная форма, геологическая активность), но в силу малой массы не способные доминировать в окрестности своей орбиты. Теперь 8 самых массивных планет — от Меркурия до Нептуна — решено называть просто планетами (*planet*), хотя в разговоре астрономы для однозначности часто называют их «большими планетами», чтобы отличать от планет-карликов. Термин «малая планета», который многие годы применялся к астероидам, теперь не рекомендовано использовать во избежание путаницы с карликовыми планетами.

В области больших планет мы видим четкое деление на две группы по 4 планеты в каждой: внешнюю часть этой области занимают планеты-гиганты, а внутреннюю — значительно менее массивные планеты земной группы. Группу гигантов также обычно делят пополам: газовые гиганты (Юпитер и Сатурн) и ледяные гиганты (Уран и Нептун). В группе планет земного типа тоже намечается деление пополам: Венера и Земля чрезвычайно похожи друг на друга по многим физическим параметрам, а Меркурий и Марс уступают им по массе на порядок и почти лишены атмосферы (даже у Марса она в сотни раз меньше земной, а у Меркурия практически отсутствует).

Следует отметить, что среди двух сотен спутников планет можно выделить не менее 16 тел, обладающих внутренними свойствами полноценных планет. Нередко они превосходят своими размерами и массами планеты-карлики, но при этом находятся под контролем гравитации значительно более массивных тел. Речь идет о Луне, Титане, галилеевых спутниках Юпитера и им подобных. Поэтому было бы естественно ввести в номенклатуру Солнечной системы новую

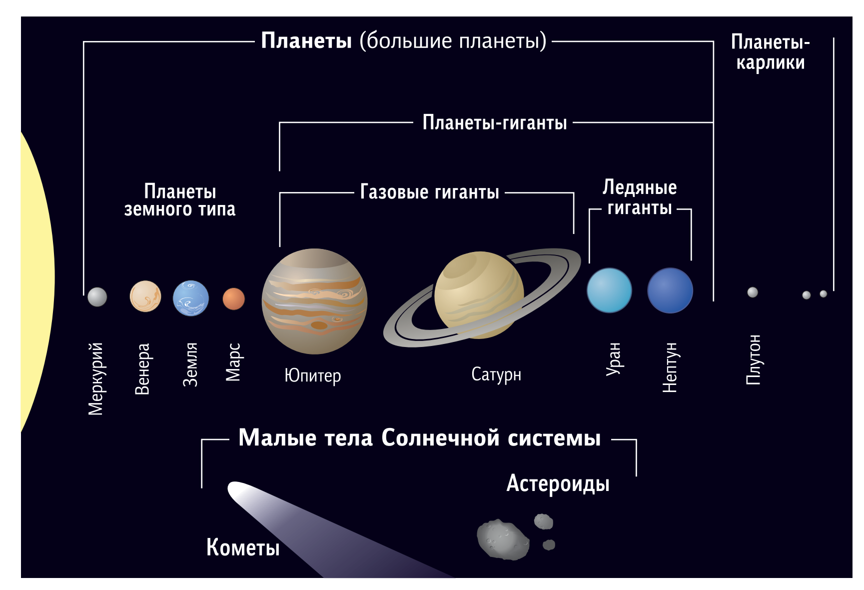



**Рис. 4.1.** Классификация тел Солнечной системы.

группу для таких «подчиненных» объектов планетного типа, назвав их «планетами-спутниками». Но пока эта идея в стадии обсуждения.

Вернемся к планетам земного типа. По сравнению с гигантами они привлекательны тем, что имеют твердую поверхность, на которую могут осуществлять посадку космические зонды. Начиная с 1970-х гг. автоматические станции и самоходные аппараты СССР и США неоднократно садились на поверхность Венеры и Марса и успешно там работали. Посадок на Меркурий пока не было, поскольку полеты в окрестности Солнца и посадка на массивное безатмосферное тело технически весьма сложны.

Изучая планеты земного типа, астрономы не забывают и саму Землю. Анализ снимков из космоса позволил многое понять в динамике земной атмосферы, в строении ее верхних слоев (куда не поднимаются самолеты и даже аэростаты), в процессах, происходящих в ее магнитосфере. Сравнивая между собой строение атмосфер землеподобных планет, можно многое понять в их истории и точнее прогнозировать их будущее. А поскольку все высшие растения и животные обитают на поверхности нашей (или не только нашей?) планеты, особенно важны для нас характеристики нижних слоев атмосферы. Эта лекция посвящена планетам земного типа, в основном их внешнему виду и условиям на поверхности.

### Яркость планеты. Альбедо

Глядя на планету издалека, мы легко различаем тела с атмосферой и без нее. Присутствие атмосферы, а точнее наличие в ней облаков, делает внешность планеты изменчивой и существенно повышает яркость ее диска. Это ясно видно, если расположить планеты в ряд от совершенно безоблачных (безатмосферных) до полностью закрытых облаками: Меркурий, Марс, Земля, Венера. Каменистые безатмосферные тела похожи друг на друга до почти полной неразличимости: сравните, например, крупномасштабные снимки Луны и Меркурия. Даже опытный глаз с трудом различает между собой поверхности этих темных тел, густо покрытых метеоритными кратерами. Зато атмосфера придает любой планете неповторимый вид.

Наличием или отсутствием атмосферы у планеты управляют три фактора: температура, гравитационный потенциал у поверхности и глобальное магнитное поле. Такое поле есть только у Земли, и оно существенно защищает нашу атмосферу от потоков солнечной плазмы. Луна потеряла атмосферу (если вообще ее имела) из-за низкой критической скорости у поверхности, а Меркурий — из-за высокой температуры и мощного солнечного ветра. Марс при почти той же гравитации, что у Меркурия, смог сохранить остатки атмосферы, поскольку из-за удаленности от Солнца он холоден и не так интенсивно обдувается солнечным ветром.

По своим физическим параметрам Венера и Земля — почти близнецы. У них весьма схожи размер, масса, а значит, и средняя плотность. Их внутренняя структура — кора, мантия, железное ядро — также должна быть сходной, хотя уверенности в этом пока нет, поскольку сейсмические и прочие геологические данные о недрах Венеры отсутствуют. Разумеется, и в недра Земли мы глубоко не проникали: в большинстве мест — на 3–4 км, в отдельных точках — на 7–9 км и лишь в одной — на 12 км. Это менее 0,2% радиуса Земли. Но сейсмические, гравиметрические и другие измерения позволяют судить о земных недрах весьма детально, а для других планет таких данных почти нет. Детальные карты гравитационного поля получены только для Луны; потоки тепла из недр измерены только на Луне; сейсмометры пока работали тоже лишь на Луне и (не очень чувствительный) на Марсе.

О внутренней жизни планет геологи до сих пор судят по особенностям их твердой поверхности. Например, отсутствие признаков литосферных плит у Венеры существенно отличает ее от Земли, в эволю-

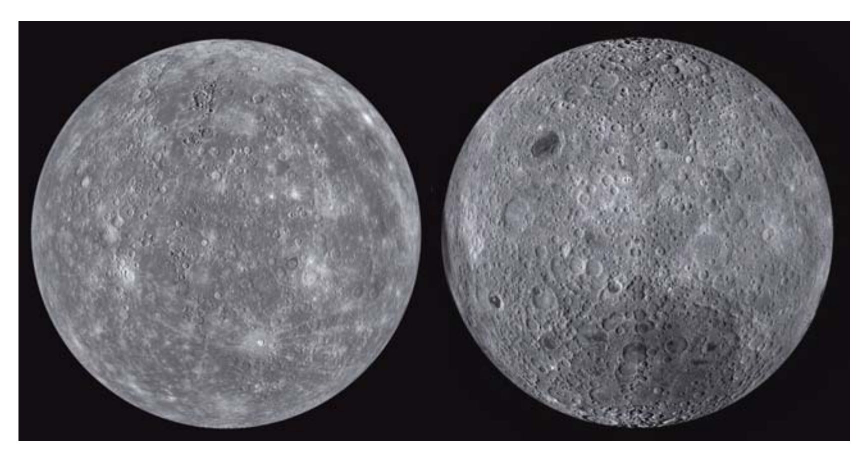


**Рис. 4.2.** Поверхности Меркурия (слева) и Луны (показана ее невидимая с Земли сторона). Очевидно, что они очень похожи. Фото Меркурия: спутник «Messenger» (NASA). Фото Луны: спутник LRO (NASA).

ции поверхности которой тектонические процессы (дрейф континентов, спрединг, субдукция и т. п.) играют определяющую роль. В то же время некоторые косвенные данные указывают на возможность тектоники плит на Марсе в прошлом, а также тектоники ледяных полей на Европе, спутнике Юпитера. Таким образом, внешнее сходство планет (Венера — Земля) не гарантирует сходства их внутреннего строения и процессов в их недрах. А планеты, не похожие друг на друга, могут демонстрировать сходные геологические явления.

Вернемся к тому, что доступно астрономам и прочим специалистам для прямого изучения, а именно — к поверхности планет или их облачного слоя. В принципе непрозрачность атмосферы в оптическом диапазоне не является непреодолимым препятствием для изучения твердой поверхности планеты. Радиолокация с Земли и с борта космических зондов позволила изучить поверхности Венеры и Титана сквозь их непрозрачные для света атмосферы. Однако эти работы носят эпизодический характер, а систематические исследования планет до сих пор проводятся оптическими приборами. И что еще более важно: оптическое излучение Солнца служит главным источником энергии для большинства планет. Поэтому способность атмосферы отражать, рассеивать и поглощать это излучение прямо влияет на климат у поверхности планеты.

Яркость поверхности планеты зависит от ее расстояния от Солнца, а также от наличия и свойств ее атмосферы. Облачная атмосфе-



**Рис. 4.3.** **Фото Земли и Луны, полученное зондом «Галилео» (NASA).**

ра Венеры отражает свет в 2–3 раза лучше, чем частично облачная атмосфера Земли, а безатмосферная поверхность Луны — втрое хуже земной атмосферы. Ярчайшее светило на ночном небе, не считая Луну, — Венера. Она очень яркая не только из-за относительной близости к Солнцу, но и из-за плотного облачного слоя из капель концентрированной серной кислоты, прекрасно отражающего свет. Наша Земля тоже не слишком темная, поскольку 30–40% земной атмосферы заполнены водяными облаками, а они тоже хорошо рассеивают и отражают свет. Вот фотография (рис. 4.3), где в кадр одновременно попали Земля и Луна. Этот снимок сделал космический зонд «Галилео», пролетая мимо Земли по пути к Юпитеру. Посмотрите, насколько Луна темнее Земли и вообще темнее любой планеты с атмосферой. Это общая закономерность: безатмосферные тела очень темные. Дело в том, что под воздействием космической радиации любое твердое вещество постепенно темнеет.

Утверждение, что поверхность Луны темная, обычно вызывает недоумение: на первый взгляд лунный диск выглядит очень ярким, безоблачной ночью он даже ослепляет нас. Но это лишь по контрасту с еще более темным ночным небом. Для характеристики отражающей способности любого тела используют величину под названием *альбедо*. Это степень белизны, то есть коэффициент отражения света. Альбедо, равное нулю, — абсолютная чернота, полное поглощение света. Альбедо, равное единице, — полное отражение. У физиков и астрономов есть несколько различных подходов к определению альбедо. Ясно, что яркость освещенной поверхности зависит не только от типа материала, но и от его структуры и ориентации относительно источника света и наблюдателя. Например, пушистый свежевыпавший снег имеет одно значение коэффициента отражения, а снег, в который вы наступили ботинком, — совсем другое. А зависимость от ориентации легко продемонстрировать зеркальцем, пуская солнеч-

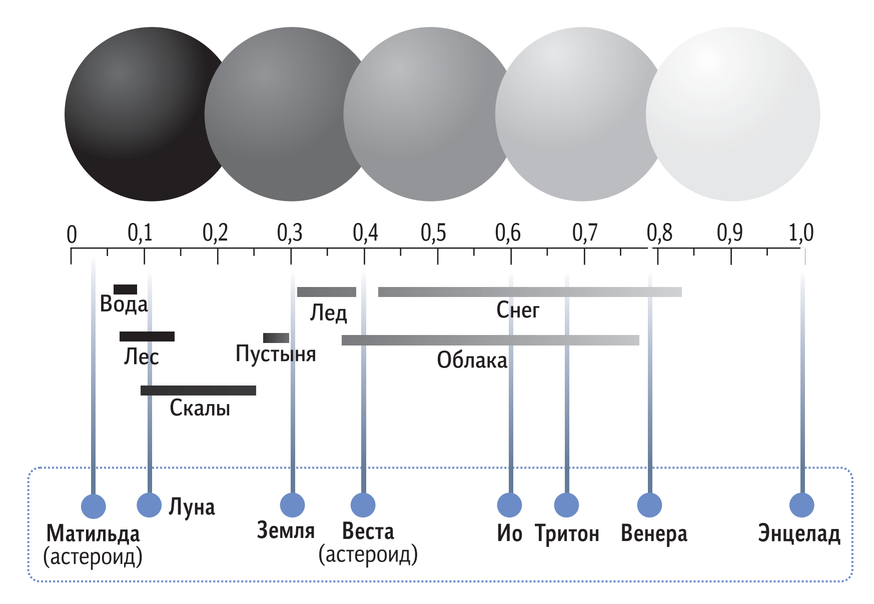



**Рис. 4.4. Альбедо — доля солнечного света, отраженная поверхностью. Показан диапазон значений альбедо типичных поверхностей на Земле, а также альбедо Бонда некоторых космических тел.**

ных зайчиков. Точное определение альбедо различного типа дано в главе «Краткий справочник» (с. 325). Знакомые поверхности с разным альбедо — бетон и асфальт. Освещенные одинаковыми потоками света, они демонстрируют разную визуальную яркость: у свежевымытого асфальта альбедо около 10%, а у чистого бетона — около 50%.

Весь диапазон возможных значений альбедо перекрыт известными космическими объектами. Скажем, Земля отражает около 30% солнечных лучей, в основном благодаря облакам, а сплошной облачный покров Венеры отражает 77% света. Наша Луна — одно из самых темных тел, в среднем отражающее около 11% света, а ее видимое полушарие из-за наличия обширных темных «морей» отражает свет еще хуже — менее 7%. Но встречаются и еще более темные объекты — например, астероид 253 Матильда с его альбедо в 4%. С другой стороны, есть удивительно светлые тела: спутник Сатурна Энцелад отражает 81% видимого света, а его геометрическое альбедо просто фантастическое — 138%, т. е. он ярче идеально белого диска такого же сечения. Даже трудно понять, как ему это удается. Чистый снег на Земле и то хуже отражает свет; какой же снег лежит на поверхности маленького и симпатичного Энцелада?

### Тепловой баланс

Температура любого тела определяется балансом между притоком к нему тепла и его потерями. Известны три механизма обмена теплом: излучение, теплопроводность и конвекция. Два последних процесса требуют прямого контакта с окружающей средой, поэтому в космическом вакууме важнейшим и, по сути, единственным становится первый механизм — излучение. Для конструкторов космической техники это создает немалые проблемы. Им приходится учитывать несколько источников тепла: Солнце, планету (особенно на низких орбитах) и внутренние агрегаты самого космического аппарата. А для сброса тепла есть лишь один способ — излучение с поверхности аппарата. Для поддержания баланса тепловых потоков конструкторы космической техники регулируют эффективное альбедо аппарата с помощью экранно-вакуумной изоляции и радиаторов. Когда такая система дает сбой, условия в космическом корабле могут стать весьма некомфортными, о чем напоминает нам история экспедиции «Аполлон-13» к Луне.

Но впервые с этой проблемой столкнулись еще в первой трети XX в. создатели высотных аэростатов — так называемых стратостатов. В те годы еще не умели создавать сложные системы терморегулирования герметичной гондолы, поэтому ограничивались простым подбором альбедо ее внешней поверхности. Насколько чувствительна температура тела к его альбедо, говорит история первых полетов в стратосферу. Швейцарец Огюст Пикар покрасил гондолу своего стратостата FNRS-1 с одной стороны в белый, а с другой — в черный цвет. Предполагалось регулировать температуру в гондоле, поворачивая сферу той или иной стороной к Солнцу: для этой цели снару-



**Рис. 4.5.** Огюст Пикар готовится к полету на стратостате FNRS-1 (1931 г.)




**Рис. 4.6.** Экипаж стратостата «Explorer II» (1935 г.)

жи установили пропеллер. Но устройство не заработало, солнце светило с «черной» стороны, и внутренняя температура в первом полете поднялась до +38 °C. В следующем полете всю капсулу просто покрыли серебряной краской для отражения солнечных лучей. Внутри стало минус 16 °C.

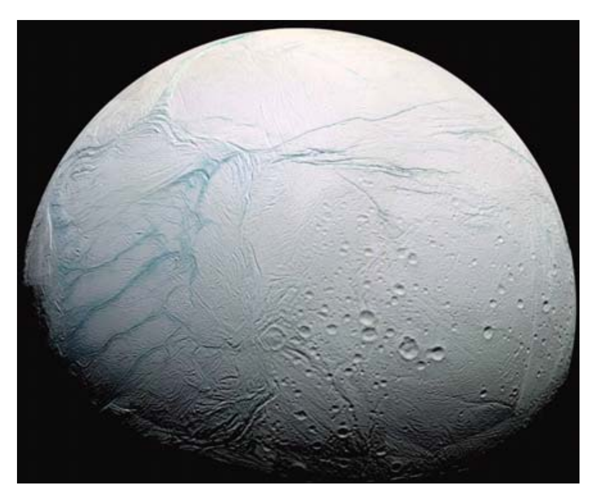


**Рис. 4.7.** Энцелад — спутник Сатурна, обладающий чрезвычайно высоким альбедо. Фото зонда «Кассини» (NASA).

Американские конструкторы стратостата «Explorer» учли опыт Пикара и приняли компромиссный вариант: покрасили верхнюю часть капсулы в белый, а нижнюю — в черный цвет. Идея состояла в том, что верхняя половина сферы будет отражать солнечное излучение, а нижняя — поглощать тепло от Земли. Этот вариант оказался неплохим, но тоже не идеальным: во время полетов в капсуле было +5 °С.

Советские стратонавты просто теплоизолировали алюминиевые капсулы слоем войлока. Как показала практика, такое решение было самым удачным. Внутреннего тепла, в основном выделяемого экипажем, оказалось достаточно для поддержания стабильной температуры.

Но если планета не имеет собственных мощных источников тепла, то значение альбедо очень важно для ее климата. Например, наша планета поглощает 70% падающего на нее солнечного света, перерабатывая его в собственное инфракрасное излучение, поддерживая за счет него круговорот воды в природе, запасая его в результате фотосинтеза в биомассе, нефти, угле, газе. Луна поглощает почти весь солнечный свет, «бездарно» превращая его в высокоэнтропийное инфракрасное излучение и за счет этого поддерживая свою довольно высокую температуру. Зато Энцелад своей идеально белой поверхностью гордо отталкивает от себя почти весь солнечный свет, за что и расплачивается чудовищно низкой температурой поверхности: в среднем около −200 °С, а местами до −240 °С. Впрочем, этот спутник — «весь в белом» — не сильно страдает от наружного холода,

поскольку у него есть альтернативный источник энергии — приливное гравитационное влияние соседа-Сатурна (глава 6), поддерживающее его подледный океан в жидком состоянии. Но у планет земной группы внутренние источники тепла очень слабы, поэтому температура их твердой поверхности в значительной степени зависит от свойств атмосферы — от ее способности, с одной стороны, отражать часть солнечных лучей обратно в космос, а с другой — удерживать энергию излучения, прошедшего сквозь атмосферу к поверхности планеты.

### Парниковый эффект и климат планеты

В зависимости от того, как далеко от Солнца находится планета и какую долю солнечного света она поглощает, формируются температурные условия на поверхности планеты, ее климат. Как выглядит спектр любого самосветящегося тела, например звезды? В большинстве случаев спектр звезды — это «одногорбая», почти планковская кривая, у которой положение максимума зависит от температуры поверхности звезды. В отличие от звезды, у спектра планеты два «горба»: часть звездного света она отражает в оптическом диапазоне, а другую часть поглощает и переизлучает в инфракрасном диапазоне. Относительная площадь под этими двумя горбами как раз и определяется степенью отражения света, то есть альбедо.

Посмотрим на две ближайшие к нам планеты — Меркурий и Венеру. На первый взгляд ситуация парадоксальная. Венера отражает почти 80% солнечного света и лишь около 20% поглощает, а Меркурий почти ничего не отражает, а всё поглощает. К тому же Венера дальше от Солнца, чем Меркурий; на единицу ее облачной поверхности падает в 3,4 раза меньше солнечного света. С учетом разницы в альбедо каждый квадратный метр твердой поверхности Меркурия получает почти в 16 раз больше солнечного тепла, чем такой же участок на Венере. И тем не менее на всей твердой поверхности Венеры адские условия — огромная температура (олово и свинец плавятся!), а Меркурий прохладнее! На полюсах там антарктический холод, а на экваторе средняя температура +67 °C. Конечно, днем поверхность Меркурия нагревается до 430 °C, а ночью остывает до −170 °C. Но уже на глубине 1,5–2 метров суточные колебания сглаживаются, и мы можем говорить о средней температуре поверхности +67 °C. Жарковато, конечно, но жить можно. А в средних широтах Меркурия вообще комнатная температура.

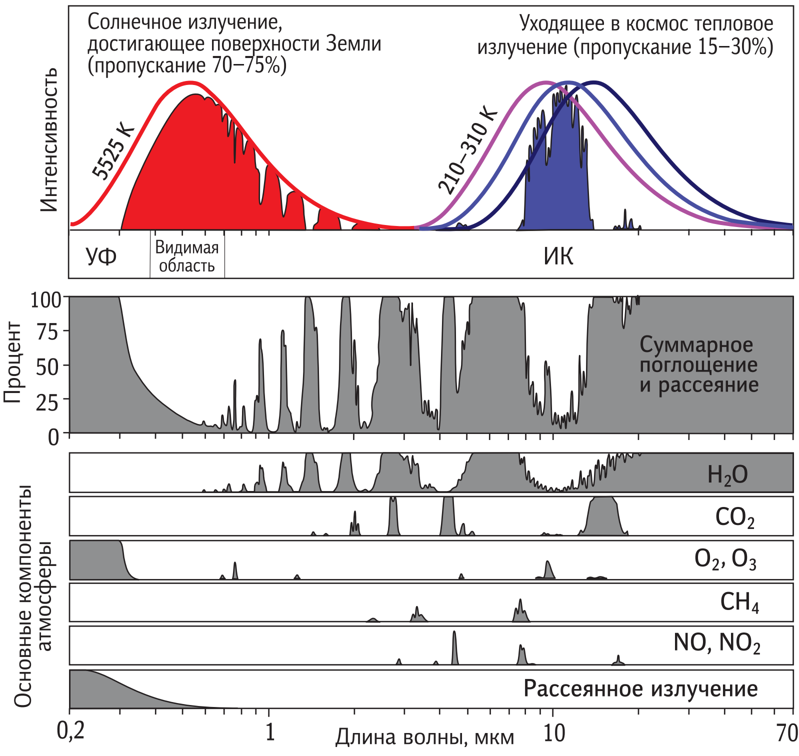



**Рис. 4.8. Спектры отраженного атмосферой и поглощенного земной поверхностью солнечного излучения и вклад отдельных компонентов атмосферы в поглощение.**

В чем же дело? Почему близкий к Солнцу и охотно поглощающий его лучи Меркурий нагрет до комнатной температуры, а Венера, более далекая от Солнца и активно отражающая его лучи, раскалена как печь? Как объяснит это физика?

Атмосфера Земли почти прозрачна: она пропускает 80% приходящего солнечного света. «Убежать» в космос в результате конвекции воздух не может — планета не отпускает его. Значит, охлаждаться она может только в виде инфракрасного излучения. А если ИК-излучение остается запертым, то оно нагревает те слои атмосферы, которые его не выпускают. Эти слои сами становятся источником тепла и частично направляют его обратно к поверхности. Некоторая часть излучения уходит в космос, но основная его часть возвращается к поверхности Земли и греет ее до тех пор, пока не установится термодинамическое равновесие. А как оно устанавливается?

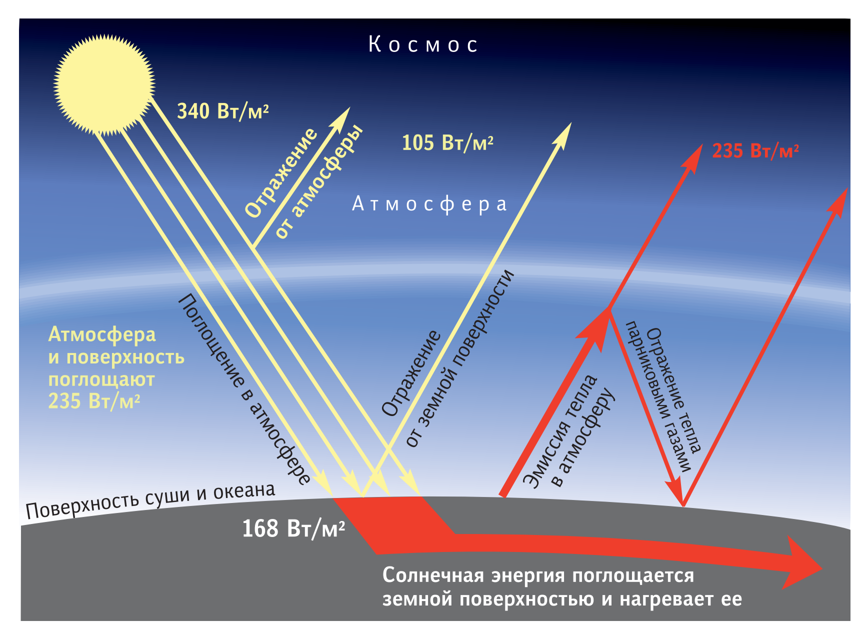



**Рис. 4.9.** Потоки тепла у Земли. Указаны средние потоки лучистого тепла на единицу поверхности.

Температура растет, и максимум в спектре смещается (закон Вина) до тех пор, пока не найдет в атмосфере «окно прозрачности», сквозь которое ИК-лучи уйдут в космос. Баланс тепловых потоков устанавливается, но при более высокой температуре, чем могло бы быть при отсутствии атмосферы. Это и есть парниковый эффект.

В своей жизни мы довольно часто сталкиваемся с парниковым эффектом. И не только в виде садового парника или толстой шубы,

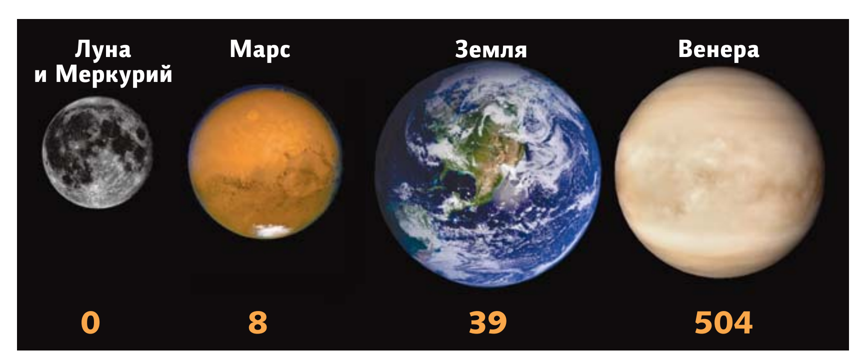



**Рис. 4.10.** Влияние парникового эффекта ($\Delta T$, K) на среднюю температуру поверхности планет.

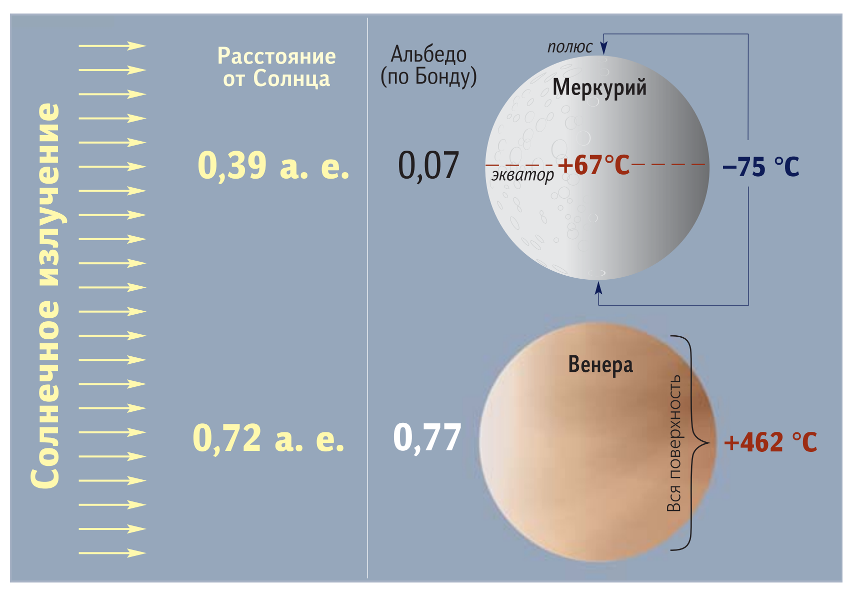



**Рис. 4.11.** **Несмотря на относительную удаленность от Солнца и высокое альбедо, температура поверхности Венеры в результате парникового эффекта значительно выше средней температуры поверхности Меркурия.**

которую надевают в морозный день, чтобы согреться (хотя сама шуба не выделяет, а лишь удерживает тепло). Как раз эти примеры не демонстрируют чистый парниковый эффект, поскольку в них уменьшается как лучистый, так и конвективный отвод тепла. Гораздо ближе к описанному эффекту пример ясной морозной ночи. При сухом воздухе и безоблачном небе (например, в пустыне) после захода солнца земля быстро остывает, а влажный воздух и облака сглаживают суточные колебания температуры. К сожалению, этот эффект хорошо знаком астрономам: ясные звездные ночи бывают особенно холодными, что делает работу у телескопа весьма некомфортной. Вернувшись к рис. 4.8, мы увидим причину: именно пары́ воды в атмосфере служат главным препятствием для уносящего тепло ИК-излучения.

У Луны нет атмосферы, а значит, нет и парникового эффекта. На ее поверхности термодинамическое равновесие устанавливается в явном виде, никакого обмена излучением между атмосферой и твердой поверхностью нет. У Марса разреженная атмосфера, но все-таки ее парниковый эффект добавляет свои 8 °C. А Земле он добавляет почти 40 °C. Если бы у нашей планеты не было такой плот-

ной атмосферы, температура Земли была бы на 40° ниже. Сегодня она составляет по всему земному шару в среднем +15 °C, а было бы –25 °C. Все океаны замерзли бы, поверхность Земли от снега стала бы белой, альбедо повысилось, и температура упала бы еще ниже. В общем — страшное дело! Хорошо, что парниковый эффект в нашей атмосфере работает и греет нас. И еще гораздо сильнее он работает на Венере — более чем на 500 °C поднимает среднюю венерианскую температуру.

### Поверхность планет

До сих пор мы не приступали к детальному изучению иных планет, в основном ограничиваясь наблюдением их поверхности. А насколько важна для науки информация о внешнем виде планеты? Что ценного может поведать нам изображение ее поверхности? Если это газовая планета, как Сатурн или Юпитер, или же твердая, но покрытая плотным слоем облаков, как Венера, то мы видим лишь верхний облачный слой и, следовательно, почти никакой информации о самой планете не имеем. Облачная атмосфера, как говорят геологи, —это супермолодая поверхность: сегодня она такая, а завтра будет иной (или не завтра, а через 1000 лет, что лишь миг в жизни планеты).

Большое Красное Пятно на Юпитере или два планетарных циклона на Венере наблюдаются уже 300 лет, но говорят нам лишь о некоторых общих свойствах современной динамики их атмосфер. Наши потомки, глядя на эти планеты, будут видеть совсем иную картину, а какую картину могли видеть наши предки, мы никогда не узнаем. Таким образом, глядя со стороны на планеты с плотной атмосферой, мы не можем судить об их прошлом, поскольку видим лишь изменчивый облачный слой. Совсем другое дело — Луна или Меркурий, поверхности которых хранят следы метеоритных бомбардировок и геологических процессов, происходивших в течение последних миллиардов лет.

А подобные бомбардировки планет-гигантов практически не оставляют следов. Одно из таких событий произошло в конце XX века прямо на глазах астрономов. Речь идет о комете Шумейкеров—Леви-9. В 1993 г. недалеко от **Юпитера** была замечена странная цепочка из двух десятков небольших комет. Расчет показал, что это фрагменты одной кометы, пролетавшей рядом с Юпитером в 1992 г. и разорванной на части приливным эффектом его мощного гравитационного поля. Сам эпизод распада кометы астрономы не видели, а за-



**Рис. 4.12.** Фрагменты кометы Шумейкеров—Леви-9 (май 1994 г.). Фото космического телескопа «Хаббл» (NASA).

стали лишь тот момент, когда цепочка кометных осколков «паровозиком» удалялась от Юпитера. Если бы не произошло распада, то комета, подлетев к Юпитеру по гиперболической траектории, по второй ветви гиперболы ушла бы вдаль и, скорее всего, больше никогда не сблизилась бы с Юпитером. Но тело кометы не выдержало приливного напряжения и разрушилось, а затрата энергии на деформацию и разрыв тела кометы уменьшила кинетическую энергию ее орбитального движения, переведя осколки с гиперболической орбиты на эллиптическую, замкнутую вокруг Юпитера. Расстояние орбиты в перицентре оказалось меньше радиуса Юпитера, и в 1994 г. осколки врезались в планету один за другим.

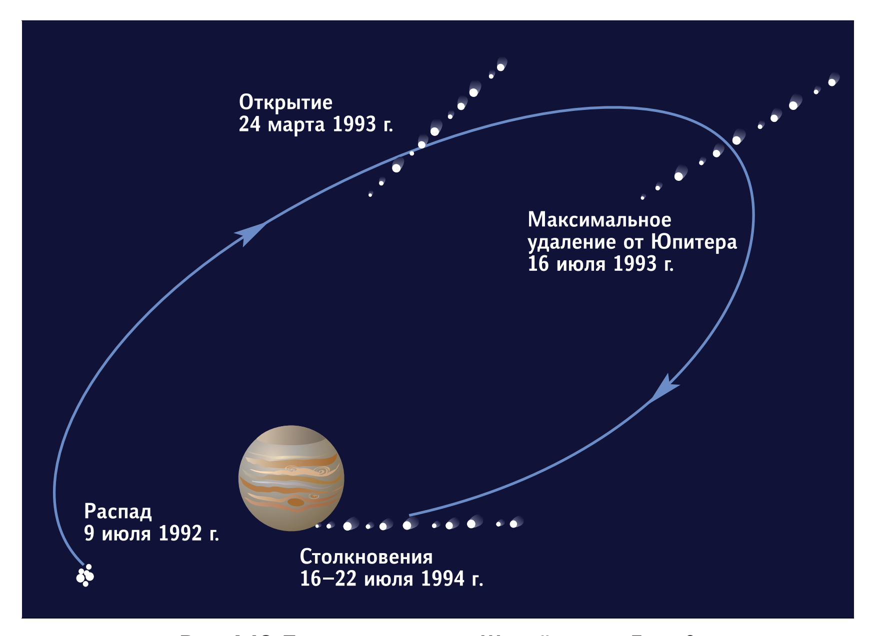
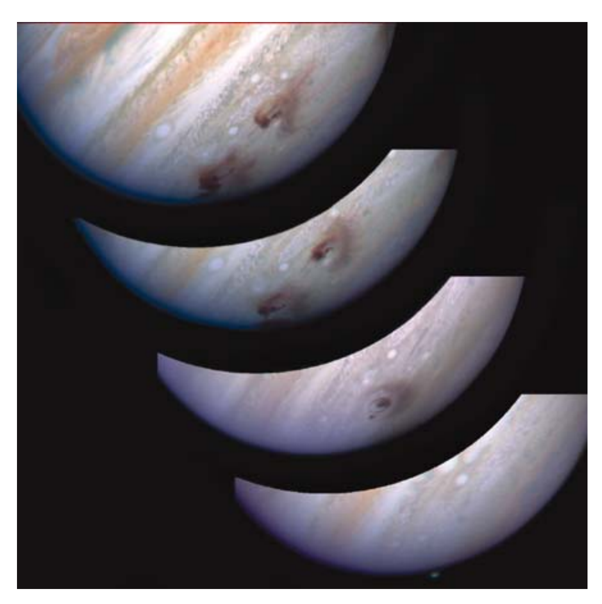



**Рис. 4.13.** Траектория кометы Шумейкеров— Леви-9

**Рис. 4.14.** **Следы на поверхности атмосферы Юпитера от столкновения с кометой были заметны в течение нескольких месяцев. Наблюдение за последствиями этого редкого космического события вели многие наземные и космические исследовательские станции. Серия снимков сделана космическим телескопом «Хаббл» (последовательность кадров — справа налево).**



Происшествие было грандиозное. Каждый «осколочек» кометного ядра — это ледяная глыба размером 1÷1,5 км. Они по очереди влетали в атмосферу гигантской планеты со скоростью 60 км/с (вторая космическая скорость для Юпитера), обладая удельной кинетической энергией, в $(60/11)^2 \approx 30$ раз большей, чем если бы это было столкновение с Землей. Астрономы с большим интересом, находясь в безопасности на Земле, наблюдали космическую катастрофу на Юпитере. К сожалению, осколки кометы били в Юпитер с той стороны, которую не было в этот момент видно с Земли. К счастью, как раз в это время на пути к Юпитеру был космический зонд «Галилео», он увидел эти эпизоды и показал их нам. За счет быстрого суточного вращения Юпитера области столкновения через несколько часов становились доступны и наземным телескопам, и, что особенно ценно, околоземным, таким как космический телескоп «Хаббл». Это было очень полезно, поскольку каждая глыба, врезаясь в атмосферу Юпитера, вызывала колоссальный взрыв, разрушающий верхний облачный слой и создающий на некоторое время окно видимости вглубь юпитерианской атмосферы. Так благодаря кометной бомбардировке мы ненадолго смогли туда заглянуть. Но прошло два месяца — и никаких следов на облачной поверхности не осталось: облака затянули все окна, как будто ничего не произошло.



**Рис. 4.15. Аризонский метеоритный кратер. Фото: Stephen Alvarez.**

Иное дело — **Земля**. На нашей планете метеоритные шрамы остаются надолго. Перед вами самый популярный метеоритный кратер диаметром около 1 км и возрастом около 50 тыс. лет (рис. 4.15). Он все еще хорошо виден. Но кратеры, образовавшиеся более 200 млн лет назад, можно найти лишь с помощью тонких геологических методов. Сверху их не видно.

Кстати, есть довольно надежное соотношение между размером упавшего на Землю крупного метеорита и диаметром образованного им кратера — 1:20. Кратер километрового диаметра в Аризоне образовался от удара маленького астероида диаметром около 50 м. А в далекие времена по Земле ударяли и более крупные «снаряды» — и километровые, и даже десятикилометровые. Мы знаем сегодня около 200 крупных кратеров; их называют *астроблемами* («небесными ранами») и каждый год обнаруживают несколько новых. На территории России крупнейший кратер — Попигай в Якутии, диаметром 100 км. Известны и более крупные астроблемы, например южноафриканский кратер Вредефорт диаметром около 300 км и возрастом около 2 млрд лет или еще не изученный кратер Земли Уилкса под ледяным щитом Антарктиды, диаметр которого оценивается в 500 км. Он выявлен по данным радиолокации и гравиметрических измерений.

На поверхности **Луны**, где нет ни ветра, ни дождя, где отсутствуют тектонические процессы, метеоритные кратеры сохраняются миллиарды лет. Глядя на Луну в телескоп, мы читаем историю космической бомбардировки. На обратной стороне — еще более полезная для науки картина. Похоже, что туда по какой-то причине никогда не падало особенно крупных тел либо, падая, они не могли пробить лунную кору, которая на обратной стороне вдвое толще, чем на видимой. Поэтому вытекавшая лава не заполняла крупные кратеры и не скрывала исторические детали. На любом клочке лунной поверхности есть метеоритный кратер, большой или маленький, и их так много, что более молодые разрушают те, что образовались раньше. Произошло насыщение: Луна уже не может стать более кратерированной, чем она есть; везде кратеры. И это замечательная летопись истории Солнечной системы: по ней выделено несколько эпизодов активного кратерообразования, в том числе эпоха тяжелой метеоритной бомбардировки (4,1÷3,8 млрд лет назад), оставившая следы на поверхности всех планет земного типа и многих спутников. Почему потоки метеоритов обрушивались на планеты в ту эпоху, нам еще предстоит понять. Нужны новые данные о строении лун-

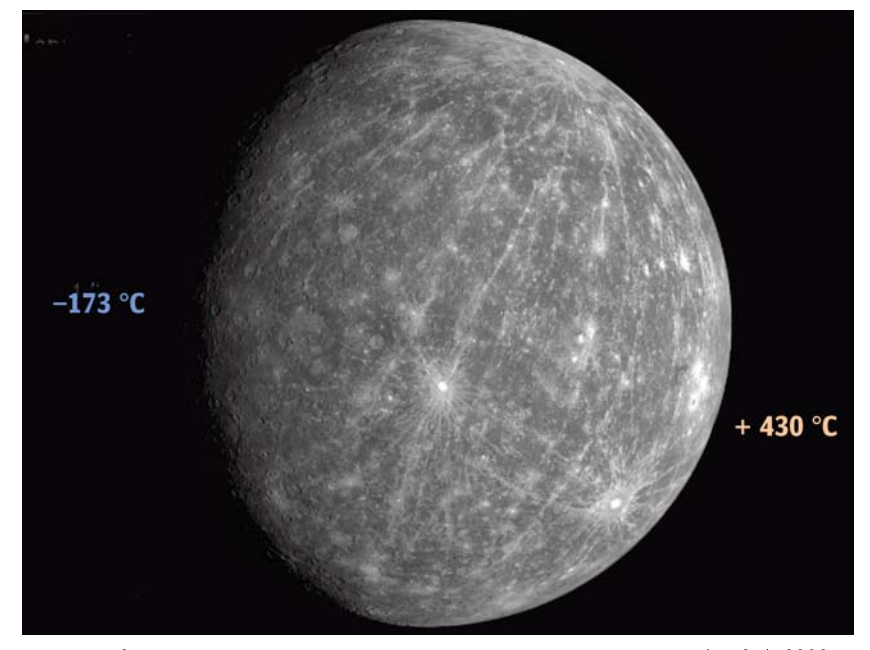



**Рис. 4.16.** Температура на Меркурии. Данные зонда «Мессенджер» (NASA), 2008 г.

ных недр и составе вещества на разной глубине, а не только на поверхности, с которой до сих пор были собраны образцы.

**Меркурий** внешне похож на Луну, поскольку, как и она, лишен атмосферы. Его каменистая поверхность, не подверженная газовой и водной эрозии, длительное время сохраняет следы метеоритной бомбардировки. Среди планет земного типа Меркурий хранит самые старые геологические следы возрастом около 4 млрд лет. Но на поверхности Меркурия нет крупных морей, заполненных темной застывшей лавой и похожих на лунные моря, хотя крупных ударных кратеров там не меньше, чем на Луне.

Размером Меркурий примерно в полтора раза больше Луны, но своей массой он превосходит Луну в 4,5 раза. Дело в том, что Луна — почти целиком каменистое тело, тогда как у Меркурия имеется огромное металлическое ядро, состоящее, по-видимому, в основном из железа и никеля. Радиус ядра составляет около 75% радиуса планеты (у Земли — лишь 55%), объем — 45% объема планеты (у Земли — 17%). Поэтому средняя плотность Меркурия (5,4 г/см$^3$) почти равна средней плотности Земли (5,5 г/см$^3$) и существенно превосходит среднюю плотность Луны (3,3 г/см$^3$). Имея большое металлическое ядро, Меркурий мог бы своей средней плотностью превосходить Землю, если бы не малая сила тяжести на его поверхности. Имея массу всего 5,5% земной, он обладает почти втрое меньшей силой тяжести, которая не в состоянии так уплотнить его недра, как уплотнились недра Земли, у которой даже силикатная мантия имеет плотность около 5 г/см$^3$.

Меркурий трудно исследовать, поскольку он движется близко к Солнцу. Чтобы запустить к нему межпланетный аппарат с Земли, его нужно сильно затормозить, т. е. разогнать в направлении, противоположном орбитальному движению Земли: только тогда он начнет «падать» в сторону Солнца. Сделать это сразу с помощью ракеты невозможно. Поэтому в двух до сих пор осуществленных полетах к Меркурию были использованы гравитационные маневры в поле Земли, Венеры и самого Меркурия для торможения космического зонда и перевода его на орбиту Меркурия.

Впервые к Меркурию отправился в 1973 г. «Маринер-10» (NASA). Он сначала сблизился с Венерой, притормозил в ее гравитационном поле и затем трижды прошел вблизи Меркурия в 1974–1975 гг. Поскольку все три встречи происходили в одной и той же области орбиты планеты, а ее суточное вращение синхронизовано с орбиталь-

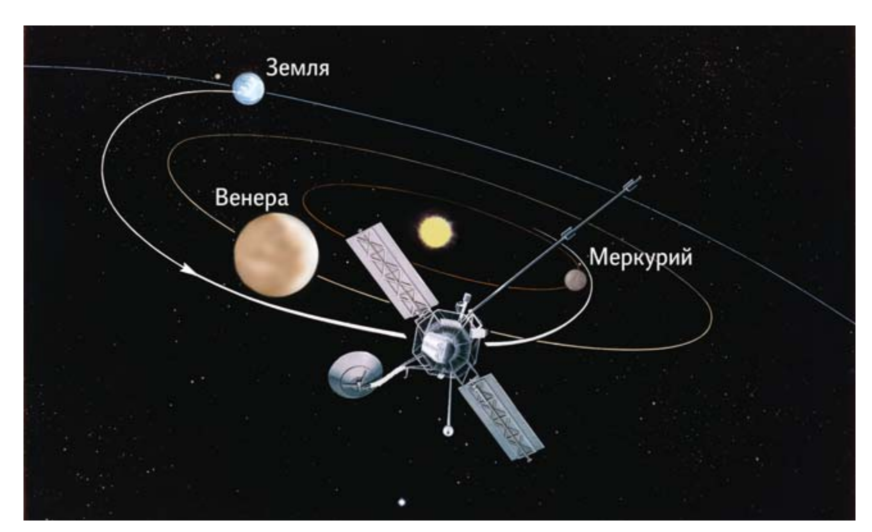



**Рис. 4.17.** Траектория полета зонда «Маринер-10» с гравитационным маневром около Венеры.

ным, все три раза зонд фотографировал одно и то же полушарие Меркурия, освещенное Солнцем.

В течение следующих нескольких десятилетий полетов к Меркурию не было. И только в 2004 г. удалось запустить второй аппарат — MESSENGER (Mercury Surface, Space Environment, Geochemistry, and Ranging; NASA). Осуществив несколько гравитационных маневров вблизи Земли, Венеры (дважды) и Меркурия (трижды), зонд в 2011 г. вышел на орбиту вокруг Меркурия и 4 года вел исследования планеты.

Работа вблизи Меркурия осложняется тем, что планета в среднем в 2,6 раза ближе к Солнцу, чем Земля, поэтому поток солнечных лучей там почти в 7 раз больше. Без специального «солнечного зонтика» электронная начинка зонда перегрелась бы. Сейчас готовится третья экспедиция к Меркурию под названием BepiColombo, в ней участвуют европейцы и японцы. Запуск намечен на осень 2018 г. Полетят сразу два зонда, которые выйдут на орбиту вокруг Меркурия в конце 2025 г. после пролета вблизи Земли, двух пролетов вблизи Венеры и шести вблизи Меркурия. Кроме детального исследования поверхности планеты и ее гравитационного поля, намечено подробное изучение магнитосферы и магнитного поля Меркурия, представляющего для ученых загадку. Хотя Меркурий вращается очень медленно, а его металлическое ядро должно было давно остыть и затвер-



**Рис. 4.18.** Зонд «Мессенджер» во время одного из наземных испытаний.

деть, планета имеет дипольное магнитное поле, уступающее земному по напряженности в 100 раз, но все же поддерживающее вокруг планеты магнитосферу. Современная теория генерации магнитного поля у небесных тел, так называемая теория турбулентного динамо, требует наличия в недрах планеты слоя жидкого проводника электричества (у Земли это внешняя часть железного ядра) и сравнительно быстрого вращения. По какой причине ядро Меркурия до сих пор остается жидким, пока не ясно.

У Меркурия есть удивительная особенность, которой нет больше ни у одной планеты. Движение Меркурия по орбите вокруг Солнца и его вращение вокруг своей оси четко синхронизованы друг с другом: за время двух орбитальных периодов он совершает три оборота вокруг оси. Вообще говоря, с синхронным движением астрономы были знакомы давно: наша Луна синхронно вращается вокруг оси и обращается вокруг Земли, периоды этих двух движений одинаковы, т. е. они находятся в соотношении 1:1. И у других планет некоторые спутники демонстрируют ту же особенность. Это результат действия приливного эффекта.

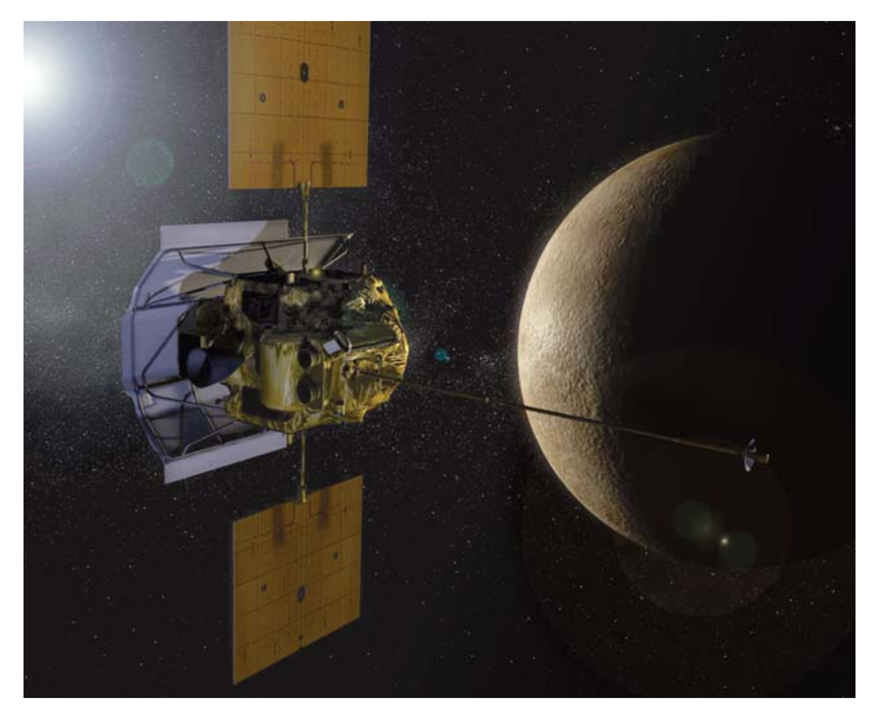


**Рис. 4.19.** Зонд «Messenger» на орбите вокруг Мерккурия. Рисунок: NASA.

Чтобы проследить за движением Меркурия, поставим на его поверхности стрелочку (рис. 4.20). Видно, что за один оборот вокруг Солнца, т. е. за один меркурианский год, планета повернулась вокруг оси ровно полтора раза. За это время день в районе стрелки сменился ночью, прошла половина солнечных суток. Еще один годичный оборот — и в районе стрелки вновь наступает день, истекли одни солнечные сутки. Таким образом, на Меркурии солнечные сутки длятся два меркурианских года.

Подробно говорить о приливах мы будем в главе 6. Именно в результате приливного влияния со стороны Земли Луна синхронизовала два своих движения — осевое вращение и орбитальное обращение. Земля очень сильно влияет на Луну: вытянула ее фигуру, стабилизировала вра-

**Рис. 4.20.** Схема орбитального и суточного движений Меркурия.

**Рис. 4.21.** **Участки поверхности Меркурия, на которых видны уступы. Эти «морщины» возникли от взаимного надвигания слоев коры планеты при остывании и сжатии ее недр. Фото: NASA.**

щение. Поскольку орбита Луны близка к круговой, Луна движется по ней с почти постоянной скоростью на почти постоянном расстоянии от Земли (степень этого «почти» мы обсуждали в главе 1). Поэтому приливный эффект меняется слабо и контролирует вращение Луны вдоль всей орбиты, приводя к резонансу 1:1.

В отличие от Луны, Меркурий движется вокруг Солнца по существенно эллиптичной орбите, то приближаясь к светилу, то удаляясь от него. Когда он далеко, в районе афелия орбиты, приливное влияние Солнца ослабевает, поскольку оно зависит от расстояния как $1/R^3$. Когда Меркурий приближается к Солнцу, приливы действуют намного сильнее, поэтому лишь в области перигелия Меркурий эффективно синхронизует два своих движения — суточное и орбитальное. Второй закон Кеплера гласит, что угловая скорость орбитального движения максимальна в точке перигелия. Именно там происходят «приливный захват» и синхронизация угловых скоростей Меркурия — суточной и орбитальной. В точке перигелия они в точности равны друг другу. Двигаясь дальше, Меркурий почти перестает ощущать приливное влияние Солнца и сохраняет свою угловую скорость вращения, постепенно снижая угловую скорость орбитального движения. Поэтому за один орбитальный период он успевает сделать полтора суточных оборота и вновь попадает «в лапы» приливного эффекта. Очень простая и красивая физика.

Поверхность Меркурия почти неотличима от лунной. Даже профессиональные астрономы, когда появились первые детальные снимки Меркурия, показывали их друг другу и спрашивали: «А нука угадай, Луна это или Меркурий?». Угадать действительно трудно:

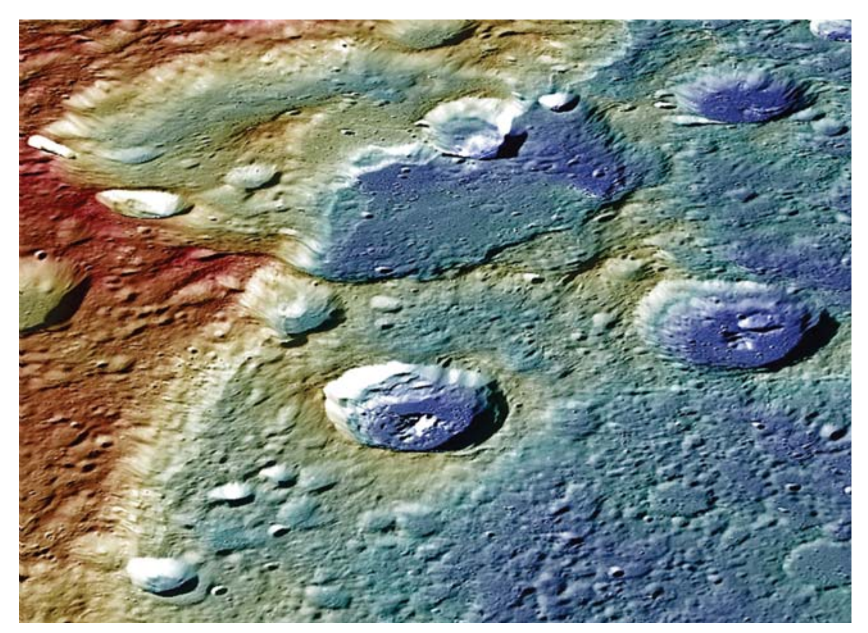


**Рис. 4.22. Рельеф Меркурия. Цвета условные (показывают высоту элементов рельефа).**

и там и там избитая метеоритами поверхность. Но особенности, конечно, есть. Хотя крупные лавовые моря на Меркурии отсутствуют, его поверхность неоднородна: есть области более старые и более молодые (основанием для этого служит подсчет метеоритных кратеров). От Луны Меркурий отличается и наличием характерных уступов и складок на поверхности, возникших в результате сжатия планеты при остывании ее огромного металлического ядра.

Перепады температуры на поверхности Меркурия больше, чем на Луне: в дневные часы на экваторе +430 °C, а ночью −173 °C. Но грунт Меркурия служит хорошим теплоизолятором, поэтому на глубине около 1 м суточные (или двухгодичные?) перепады температуры уже не чувствуются. Так что если вы прилетите на Меркурий, то первое, что нужно сделать, — вырыть землянку. В ней на экваторе будет около +70 °C: жарковато. Но в районе географических полюсов в землянке будет около −70 °C. Так что без труда можно найти географическую широту, на которой в землянке окажется комфортно.

Самые низкие температуры наблюдаются на дне полярных кратеров, куда никогда не попадают солнечные лучи. Именно там обнаружились залежи водяного льда, которые прежде были «нащупаны» радиолокаторами с Земли, а затем подтверждены приборами косми-

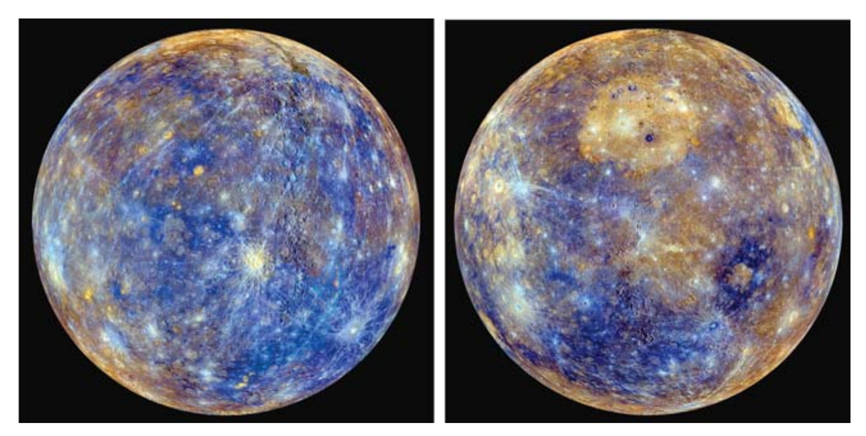


**Рис. 4.23.** **Мерурий при повышенном цветовом контрасте. Хотя поверхность планеты выглядит темно-серой, в действительности она имеет цветовые оттенки.**

ческого зонда MESSENGER. Происхождение этого льда пока обсуждается. Его источниками могут быть как кометы, так и выходящие из недр планеты пары́ воды.

Цвет у Меркурия есть, хотя на глаз он выглядит темно-серым. Но если повысить цветовой контраст (как на рис. 4.23), то планета приобретает красивый и таинственный вид.

На Меркурии есть один из самых больших ударных кратеров в Солнечной системе — Равнина Жары (Caloris Basin) диаметром 1550 км. Это след от удара астероида диаметром не менее 100 км, чуть не расколовшего маленькую планету. Случилось это около 3,8 млрд лет назад, в период так называемой «поздней тяжелой бомбардировки» (Late Heavy Bombardment), когда по не до конца понятным причинам увеличилось число астероидов и комет на орбитах, пересекающих орбиты планет земной группы.

Когда в 1974 г. «Маринер-10» сфотографировал Равнину Жары, мы еще не знали, что получилось на противоположной стороне Меркурия после этого страшного удара. Ясно, что если по шару стукнули, то возбуждаются звуковые и поверхностные волны, которые распространяются симметрично, проходят через «экватор» и собираются в антиподной точке, диаметрально противоположной точке удара. Возмущение там стягивается в точку, и амплитуда сейсмических колебаний стремительно возрастает. Это похоже на то, как погонщики скота щелкают своим кнутом: энергия и импульс волны практически сохраняются, а толщина кнута стремится к нулю, по-

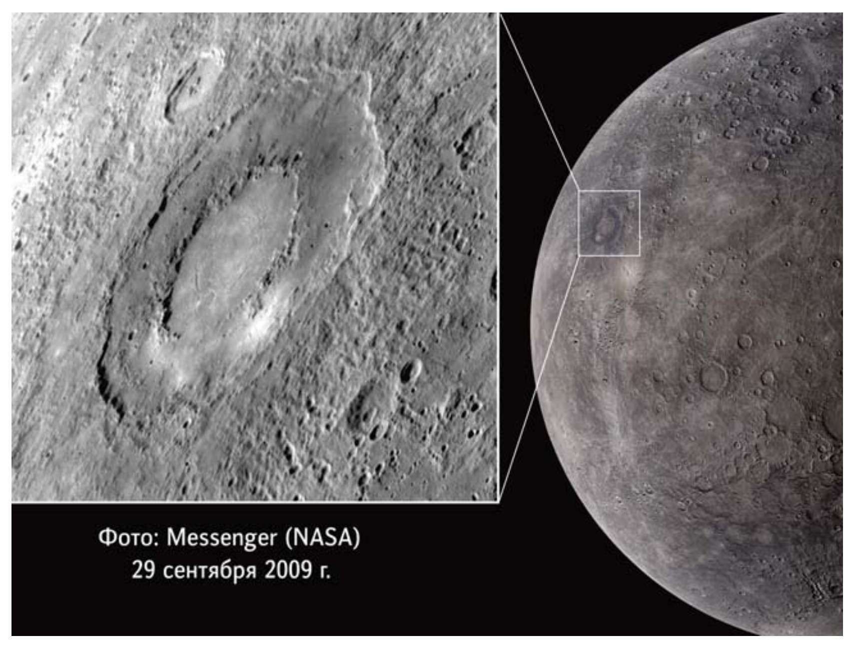



**Рис. 4.24.** Кратер Рахманинов на Меркурии.

этому скорость колебания увеличивается и становится сверхзвуковой. Ожидалось, что в области Меркурия, противоположной бассейну Caloris, будет картина невероятного разрушения. В общем, почти так и оказалось: там обнаружилась обширная холмистая область с рифленой поверхностью, хотя я ожидал, что там будет кратер-антипод. Мне представлялось, что при схлопывании сейсмической волны произойдет явление, «зеркальное» падению астероида. Мы наблюдаем это при падении капли на спокойную поверхность воды: сначала она создает маленькое углубление, а затем вода устремляется обратно и выкидывает небольшую новую каплю вверх. На Меркурии этого не случилось, и мы теперь понимаем почему: его недра оказались неоднородными, и точной фокусировки волн не произошло.

В целом рельеф Меркурия более гладкий, чем у Луны. Например, стенки меркурианских кратеров не такие высокие. Основная причина этого, вероятно, в большей силе тяжести и более теплых и мягких недрах Меркурия. К тому же на Меркурии более интенсивной должна быть метеоритная эрозия, поскольку пространственная плотность и скорость движения метеороидов в окрестности Меркурия существенно выше, чем вблизи Луны. В результате ударного испарения меж-



**Рис. 4.25.** Облачный покров атмосферы Венеры. Основой для этого синтетического изображения стали снимки «Маринера-10» (NASA), полученные в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах спектра. Оптический дал распределение цвета, а ультрафиолетовый позволил повысить контраст и более четко выделить детали. Обработка: Mattias Malmer.

планетных пылинок и более крупных метеороидных частиц, непрерывно падающих на поверхность Меркурия, его крайне разреженная экзосфера постоянно пополняется газами и парами металлов.

**Венера** — вторая планета от Солнца и самая загадочная из планет земной группы. Неясно, каково происхождение ее очень плотной атмосферы, почти целиком состоящей из углекислого газа (96,5%) и азота (3,5%) и обеспечивающей мощный парниковый эффект. Непонятно, почему Венера так медленно вращается вокруг оси — в 244 раза медленнее Земли, и к тому же в противоположном направлении. При этом массивная атмосфера Венеры, а точнее ее облачный слой, за четверо земных суток облетает вокруг планеты. Это явление называют *суперротацией* атмосферы. При этом атмосфера трется о поверхность планеты и давно должна была бы притормозиться, ведь не может она долго двигаться вокруг планеты, твердое тело которой практически стоит на месте. Но атмосфера вращается, да еще и в направлении, противоположном вращению самой планеты. Понятно, что от трения о поверхность энергия атмосферы рассеивается, а ее момент импульса передается телу планеты. Значит, есть приток энергии (очевидно — солнечной), за счет которой работает тепловая машина. Вопрос: как реализована эта машина? Как энергия Солнца трансформируется в движение венерианской атмосферы?

Из-за медленного вращения Венеры кориолисовы силы на ней слабее, чем на Земле, поэтому атмосферные циклоны там менее ком-

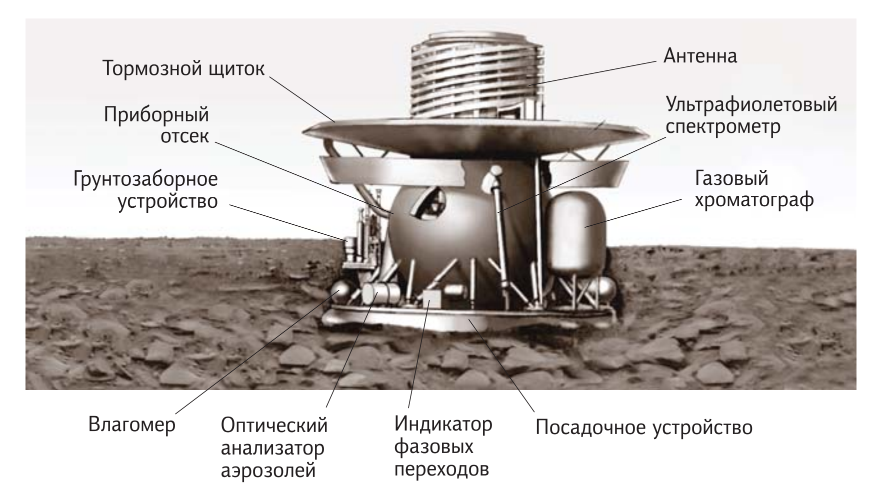



**Рис. 4.26.** **Спускаемый аппарат серии «Венера»**

пактны. По сути, их всего два: один в северном полушарии, другой в южном. Каждый из них «наматывается» от экватора на свой полюс.

Верхние слои венерианской атмосферы детально исследовали пролетные (в процессе гравитационного маневра) и орбитальные зонды — американские, советские, европейский и японский. Аппараты серии «Венера» в течение нескольких десятилетий запускали туда советские инженеры, и это был самый успешный наш прорыв в области исследования планет. Главной задачей было посадить на поверхность спускаемый аппарат, чтобы посмотреть, что там под облаками.

Конструкторы первых зондов, как и авторы научно-фантастических произведений тех лет, ориентировались на результаты оптических и радиоастрономических наблюдений, из которых следовало, что Венера — это более теплый аналог нашей планеты. Именно поэтому в середине XX в. все фантасты — от Беляева, Казанцева и Стругацких до Лема, Брэдбери и Хайнлайна — представляли Венеру как негостеприимный (жаркий, болотистый, с ядовитой атмосферой), но в целом подобный Земле мир. По этой же причине первые посадочные аппараты венерианских зондов делали не очень прочными, не способными сопротивляться большому давлению. И они гибли, спускаясь в атмосфере, один за другим. Затем их корпуса стали делать покрепче, с расчетом на давление в 20 атмосфер, но и этого оказалось мало. Тогда конструкторы, «закусив удила», создали титановый зонд, выдерживающий давление в 180 атм. И он благополучно сел на поверхность («Венера-7», 1970). Заметим, что далеко не каждая под-







**Рис. 4.27.** Снимки поверхности Венеры, сделанные аппаратом «Венера-14».

водная лодка выдерживает такое давление, царящее на глубине около 2 км в океане. Выяснилось, что у поверхности Венеры давление не опускается ниже 92 атм (9,3 МПа, 93 бар), а температура составляет 464 °C.

С мечтой о гостеприимной Венере, похожей на Землю каменноугольного периода, было окончательно покончено именно в 1970 г. Впервые аппарат, рассчитанный на такие адские условия («Венера-8»), успешно опустился и работал на поверхности в 1972 г. С этого момента посадки на поверхность Венеры стали рутинной операцией, однако долго поработать там не удается: через 1–2 часа внутренность аппарата нагревается и электроника выходит из строя.

Первые искусственные спутники появились у Венеры в 1975 г. («Венера-9 и -10»). В целом чрезвычайно удачной оказалась работа на поверхности Венеры спускаемых аппаратов «Венера-9...-14» (1975–1981 гг.), изучивших как атмосферу, так и поверхность планеты в месте посадки, сумевших даже взять пробы грунта и определить его химический состав и механические свойства. Но наибольший эффект среди поклонников астрономии и космонавтики вызвали переданные ими фотопанорамы мест посадки, сначала черно-белые, а позже — цветные. Кстати, венерианское небо при взгляде с поверхности оранжевое. Красиво! До сих пор (2017 г.) эти снимки остаются единственными и вызывают у планетологов большой интерес. Их продолжают обрабатывать и время от времени находят на них новые детали.

Существенный вклад в изучение Венеры в те годы внесла и американская космонавтика. Пролетные аппараты «Маринер-5 и -10»






**Рис. 4.28.** **Изображения, переданные «Венерой-13» 1 марта 1982 г. (слева) и «Венерой-14» 5 марта 1982 г. Спустя десятки лет удалось исправить искаженную перспективу и смягчить контраст. Но следует учесть, что эти изображения мозаичны: нижняя часть кадра взята из середины панорамы, а дальняя часть, где виден горизонт — с краев. Это работа Дона Митчелла (Don P. Mitchell), mentallandscape.com/V_Venus.htm.**

изучали верхние слои атмосферы. «Пионер-Венера-1» (1978 г.) стал первым американским спутником Венеры и провел радиолокационные измерения. А «Пионер-Венера-2» (1978 г.) послал в атмосферу планеты 4 спускаемых аппарата: один большой (315 кг) с парашютом в экваториальную область дневного полушария и три малых (по 90 кг) без парашютов — в средние широты и на север дневного полушария, а также на ночное полушарие. Ни один из них не создавался для работы на поверхности, однако один из малых аппаратов благополучно приземлился (без парашюта!) и проработал на поверхности более часа. Этот случай позволяет почувствовать, насколько велика плотность атмосферы у поверхности Венеры. Атмосфера Венеры почти в 100 раз массивнее земной, а ее плотность у поверхности составляет 67 кг/м$^3$, что в 55 раз плотнее земного воздуха и лишь в 15 раз уступает плотности жидкой воды.

Весьма непросто было создать прочные научные зонды, которые выдерживают давление венерианской атмосферы, такое же, как на километровой глубине в земных океанах. Но еще сложнее было заставить их противостоять окружающей температуре (+464 °C) при столь плотном воздухе. Поток тепла сквозь корпус колоссальный, поэтому даже самые надежные аппараты работали не более двух часов. Чтобы скорее опуститься на поверхность и продлить там работу, «Венеры» в ходе посадки сбрасывали парашют и продолжали спуск, тормозясь лишь небольшим щитком на своем корпусе. Удар о поверхность смягчало специальное демпфирующее устройство — посадочная опора.

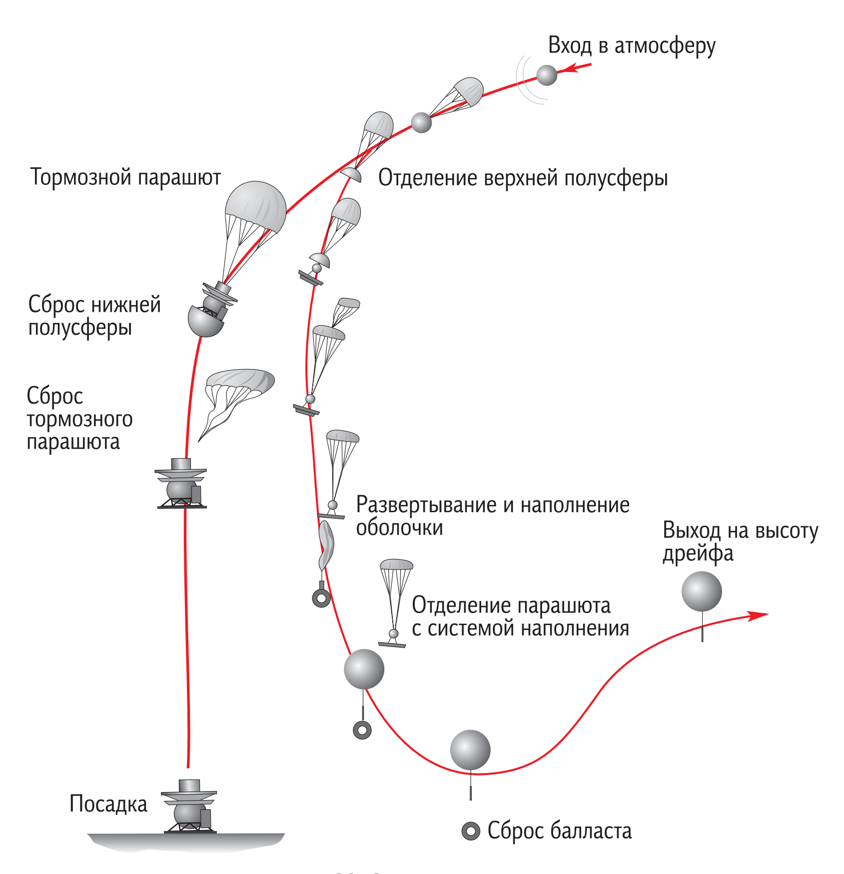



**Рис. 4.29.** Схема проекта «ВеГа».

Конструкция оказалась настолько удачной, что «Венера-9» без проблем села на склон с наклоном 35° и нормально работала.

Такие панорамы Венеры (рис. 4.27) публиковались сразу после их получения. Здесь можно заметить любопытное событие. Во время спуска каждую камеру защищала полиуретановая крышка, которая после посадки отстреливалась и падала вниз. На верхнем снимке эта белая полукруглая крышка видна у посадочной опоры. А где она на нижнем снимке? Лежит левее центра. Именно в нее, распрямляясь, вонзил свой пробник прибор для измерения механических свойств грунта. Измерив ее твердость, он подтвердил, что это полиуретан. Прибор, так сказать, был испытан в полевых условиях. Вероятность этого печального события была близка к нулю, но оно произошло!

Учитывая высокое альбедо Венеры и колоссальную плотность ее атмосферы, ученые сомневались, что у поверхности будет достаточно солнечного света для фотографирования. К тому же у дна газового океана Венеры вполне мог висеть плотный туман, рассеивающий солнечный свет и не позволяющий получить контрастное изображение. Поэтому на первых посадочных аппаратах ставили галогенные ртутные лампы для освещения почвы и создания светового контраста. Но оказалось, что естественного света там вполне достаточно: на Венере светло, как в пасмурный день на Земле. И контраст при естественном освещении тоже вполне приемлемый.



**Рис. 4.30.** Аэростат в атмосфере Венеры. Рисунок: ESA.

В октябре 1975 г. посадочные аппараты «Венера-9 и -10» через свои орбитальные блоки передали на Землю первые в истории снимки поверхности другой планеты (если не брать в расчет Луну). На первый взгляд перспектива на этих панорамах выглядят странно искаженной: причиной служит поворот направления съемки. Эти снимки получены телефотометром (оптико-механическим сканером), «взгляд» которого медленно перемещался от горизонта под «ноги» посадочного аппарата и затем к другому горизонту: получалась развертка на 180°. Два телефотометра на противоположных бортах аппарата должны были дать полную панораму. Но крышки на объективах открывались не всегда. Например, на «Венере-11 и -12» не открылась ни одна из четырех.

Один из наиболее красивых экспериментов по исследованию Венеры был проделан с помощью зондов «ВеГа-1 и -2» (1985 г.). Их название расшифровывается как «Венера—Галлей», поскольку после отделения спускаемых аппаратов, направленных к поверхности Венеры, полетные части зондов ушли исследовать ядро кометы Галлея

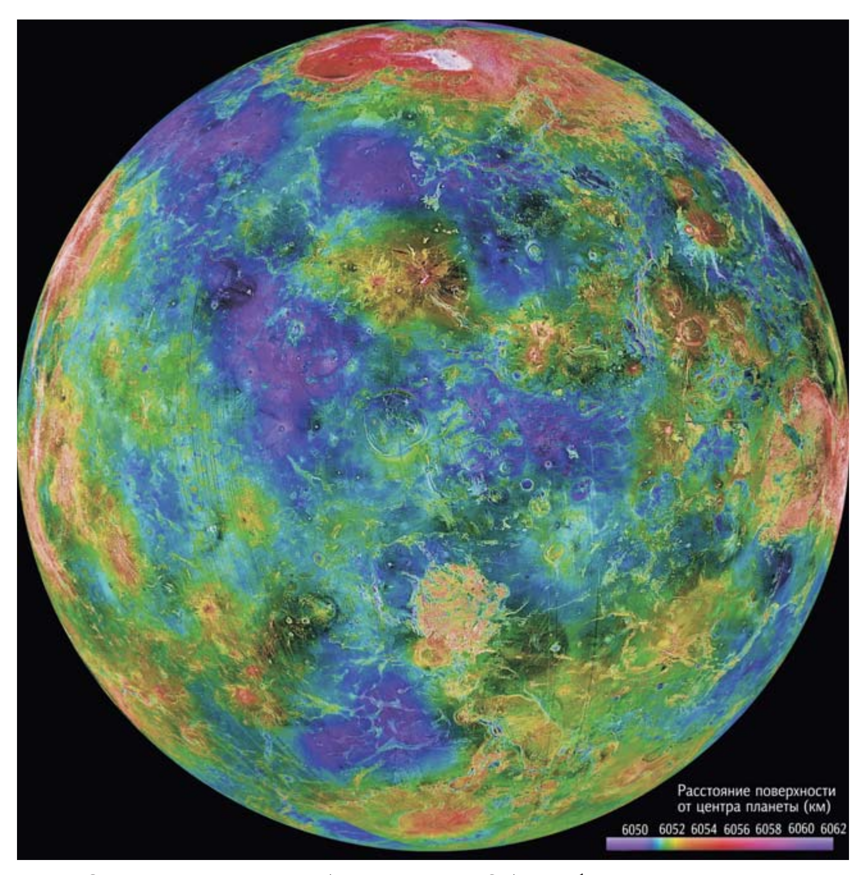
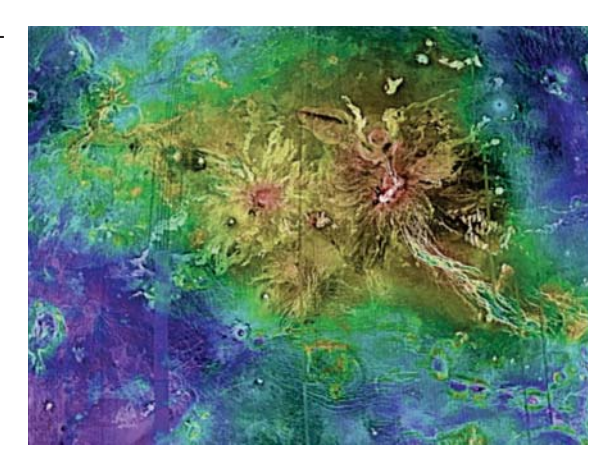



**Рис. 4.31.** Радиокарта Венеры («Магеллан», NASA). Голубым показаны низменности, зеленовато-желтым — средний уровень, красное и (особенно) белое — горы.

и впервые успешно это сделали. Посадочные аппараты были тоже не совсем обычными: главная часть аппарата садилась на поверхность, а при спуске от нее отделялся аэростат, изготовленный французскими инженерами, который около двух суток летал в атмосфере Венеры на высоте 53–55 км, передавая на Землю данные о температуре, давлении, освещенности и видимости в облаках. Благодаря мощному ветру, дующему на этой высоте со скоростью 250 км/ч, аэростаты успели облететь значительную часть планеты.

На фотографиях с мест посадки видны лишь небольшие участки венерианской поверхности. А можно ли увидеть всю Венеру сквозь облака? Можно! Радиолокатор видит сквозь облака. К Венере летали два советских спутника с радиолокаторами бокового обзора и один

**Рис. 4.32.** На этом участке радиокарты Венеры виден вулкан.



американский. По их наблюдениям составлены радиокарты Венеры с весьма высоким разрешением. На общей карте его трудно продемонстрировать, но на отдельных фрагментах карты оно ясно видно. Цветом на радиокартах показаны уровни: голубой и синий — это низменности; будь на Венере вода, это были бы океаны. Но жидкая вода на Венере существовать не может, да и газообразной воды там практически нет. Зеленоватые и желтоватые области — это континенты (назовем их так). Красное и белое — самые высокие точки на

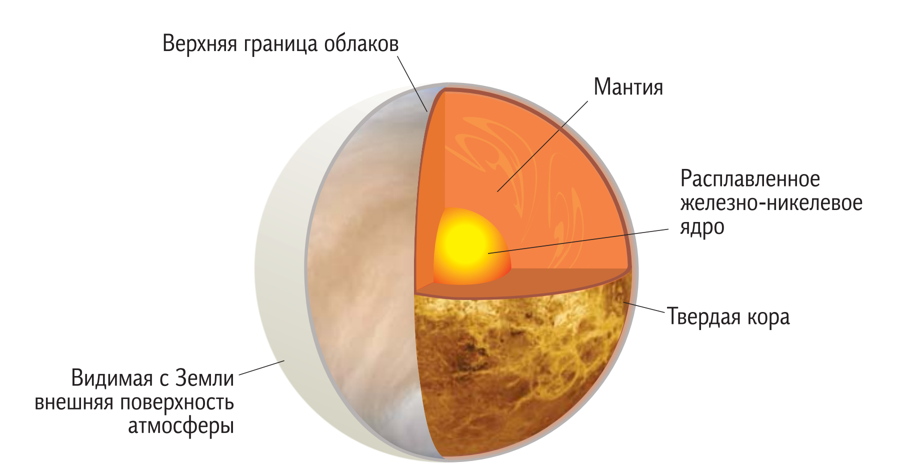



**Рис. 4.33.** Строение Венеры. Над поверхностью планеты простирается плотная облачная атмосфера, верхняя граница облаков проходит на высоте 65–70 км. Внешняя видимая с Земли «поверхность» атмосферы характеризуется наиболее резкими температурными колебаниями.

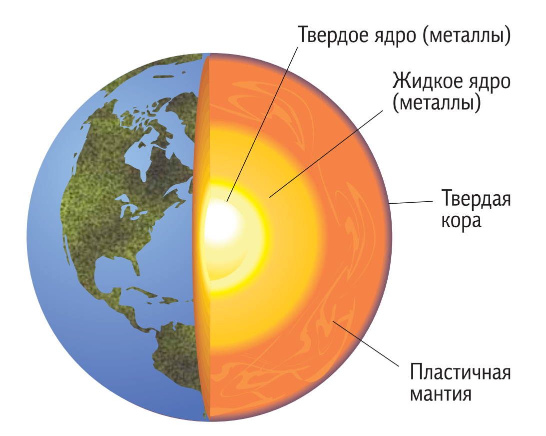



**Рис. 4.34. Строение Земли. Конвективные потоки в расплавленном веществе мантии обеспечивают магнитное поле планеты.**

Венере, это венерианский «Тибет» — самое высокое плато. Высочайшая вершина на нем — гора Максвелл — возвышается на 11 км.

Венера вулканически активна, активнее, чем сегодняшняя Земля. Это не совсем понятно. В Новосибирске работает известный геолог, академик Николай Леонтьевич Добрецов, у него имеется интересная теория по поводу эволюции Земли и Венеры (https://scfh.ru/papers/venera-vozmozhnoe-budushchee-zemli/).

О недрах Венеры, о ее внутреннем строении надежных фактов нет, поскольку сейсмические исследования там до сих пор не проводились. К тому же медленное вращение планеты не позволяет измерить ее момент инерции, который мог бы рассказать о распределении плотности с глубиной. Пока теоретические представления базируются на сходстве Венеры с Землей, а видимое отсутствие тектоники плит на Венере объясняется отсутствием на ней воды, которая на Земле служит «смазкой», позволяя плитам скользить и подныривать друг под друга. Вкупе с высокой температурой поверхности это приводит к замедлению или даже полному отсутствию конвекции в теле Венеры, снижает скорость охлаждения ее недр и может объяснить отсутствие у нее магнитного поля. Все это выглядит логично, но требует экспериментальной проверки.

Кстати, о **Земле**. Подробно обсуждать третью от Солнца планету не буду, поскольку я не геолог. К тому же каждый из нас имеет общее представление о Земле даже на основе школьных знаний. Но в связи с изучением других планет замечу, что и недра своей планеты нам понятны не до конца. Почти каждый год происходят крупные открытия в геологии, порой обнаруживают даже новые слои в недрах Земли, однако мы до сих пор точно не знаем температуру в ядре своей

планеты. Посмотрите свежие обзоры: некоторые авторы считают, что температура на границе внутреннего ядра около 5000 К, а другие — что более 6300 К. Это результаты теоретических расчетов, в которых фигурируют не вполне надежные параметры, описывающие свойства вещества при температуре в тысячи кельвинов и давлении в миллионы бар. Пока эти свойства не будут надежно изучены в лаборатории, точных знаний о недрах Земли мы не получим.

Уникальность Земли среди подобных ей планет состоит в наличии магнитного поля и жидкой воды на поверхности, причем второе, по-видимому, является следствием первого: магнитосфера Земли защищает от потоков солнечного ветра нашу атмосферу и, опосредованно, гидросферу. Для генерации магнитного поля, как сейчас представляется, в недрах планеты должны быть жидкий электропроводящий слой, охваченный конвективным движением, и быстрое суточное вращение, обеспечивающее кориолисову силу. Только при этих условиях включается динамо-механизм, усиливающий магнитное поле. Венера практически не вращается, поэтому у нее нет магнитного поля. Железное ядро у маленького Марса давно остыло и отвердело, поэтому он также лишен магнитного поля. Меркурий, казалось бы, очень медленно вращается и должен был остыть раньше Марса, но вполне ощутимое дипольное магнитное поле с напряженностью раз в 100 слабее земного у него есть. Парадокс! Ответственным за поддержание железного ядра Меркурия в расплавленном состоянии сейчас считается приливное влияние Солнца. Пройдут миллиарды лет, остынет и затвердеет железное ядро Земли, лишив нашу планету магнитной защиты от солнечного ветра. И единственной твердой планетой с магнитным полем останется, как это ни странно, Меркурий.

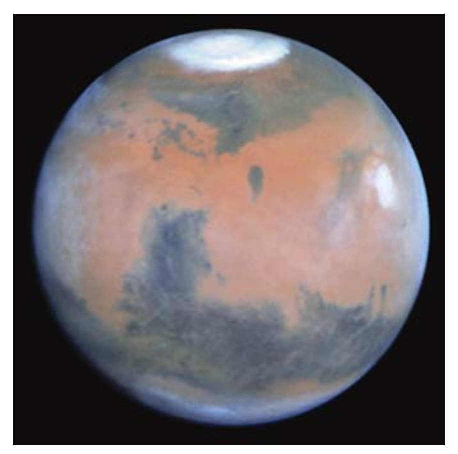


**Рис. 4.35.** Марс. Фото космического телескопа «Хаббл», февраль 1996 г.

А теперь обратимся к **Марсу**. Его внешний вид сразу же привлекает нас по двум причинам: даже на фотографиях, полученных издалека, видны белые полярные шапки и полупрозрачная атмосфера. Это роднит Марс с Землей: поляр-

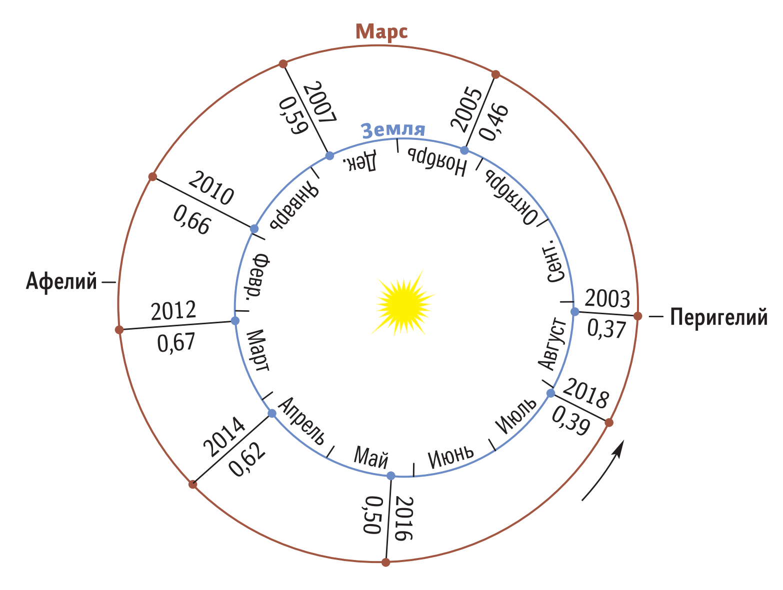



**Рис. 4.36.** Противостояния Марса.

ные шапки рождают мысль о наличии воды, а атмосфера — о возможности дыхания. И хотя на Марсе с водой и воздухом не всё так благополучно, как кажется на первый взгляд, эта планета давно привлекает исследователей.

Раньше астрономы изучали Марс в телескоп и поэтому с нетерпением ожидали моментов, называемых *противостояниями Марса.* Что же чему в эти моменты противостоит?

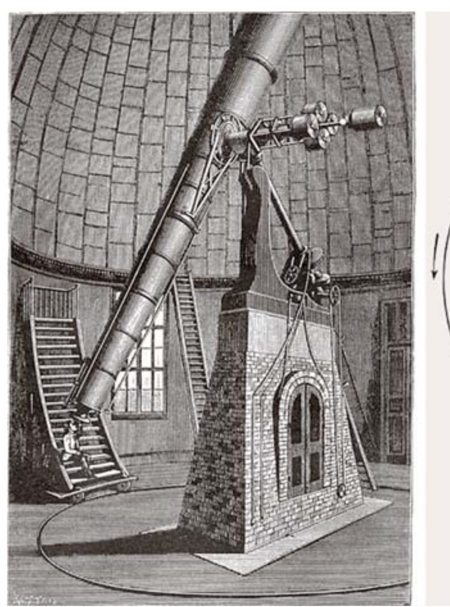
С точки зрения земного наблюдателя в момент противостояния Марс оказывается по одну сторону от Земли, а Солнце — по другую. Понятно, что именно в эти моменты Земля и Марс сближаются на минимальное расстояние, Марс виден на небе всю ночь и хорошо освещен Солнцем. Земля делает свой оборот вокруг Солнца за год, а Марс — за 1,88 года, поэтому средний промежуток времени между противостояниями занимает немногим более двух лет. Последнее противостояние Марса наблюдалось в 2016 г., правда, оно было не особенно близким. Орбита у Марса заметно эллиптическая, поэтому максимальные сближения с ним Земли случаются, когда Марс находится в районе перигелия своей орбиты. На Земле (в нашу эпоху) это конец августа. Поэтому августовские и сентябрьские противостояния называют «великими»; в эти моменты, наступающие раз в 15–17 лет, наши планеты сближаются менее чем на 60 млн км. Такое было в 2018 г.

А супертесное противостояние состоялось в 2003 г.: тогда до Марса было всего 55,8 млн км. В связи с этим родился новый термин — «величайшие противостояния Марса»: такими теперь считают сближения менее чем на 56 млн км. Они происходят 1–2 раза в столетие, однако в нынешнем веке их будет даже три — ждите 2050 и 2082 гг.



**Рис. 4.37.** **Рисунок Марса при наблюдении в телескоп с Земли.**

Но даже в моменты великих противостояний в телескоп с Земли на Марсе мало что видно. Вот (рис. 4.37) рисунок астронома, который смотрит на Марс в телескоп. Неподготовленный человек посмотрит и разочаруется — вообще ничего не увидит, лишь маленькую розовую «капельку», но опытный глаз астронома



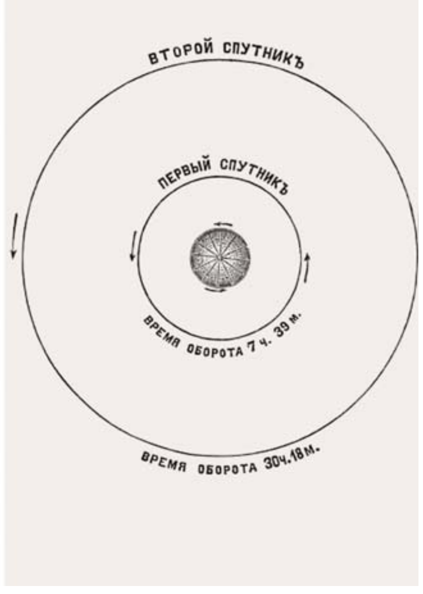



**Рис. 4.38.** **Большой экваториал Вашингтонской обсерватории, с помощью которого были открыты спутники Марса, и рисунок из книги Асафа Холла (1877) .**



**Рис. 4.39.** Джованни Скиапарелли.

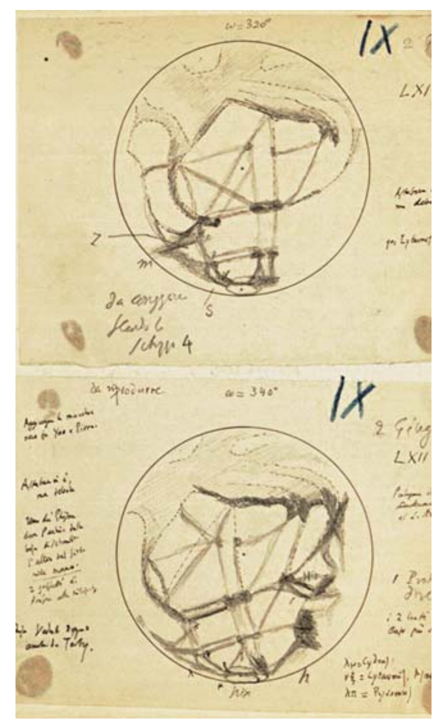


**Рис. 4.40.** Зарисовки каналов на Марсе, выполненные Дж. Скиапарелли.

в тот же самый телескоп видит больше. Полярную шапку астрономы заметили давно, еще столетия назад. А также — темные и светлые области. Темные по традиции назвали морями, а светлые — континентами.

Повышенный интерес к Марсу возник в эпоху великого противостояния 1877 г.: к тому времени уже были построены хорошие телескопы и астрономы сделали несколько важных открытий. Американский астроном Асаф Холл обнаружил спутники Марса Фобос и Деймос, а итальянский астроном Джованни Скиапарелли зарисовал загадочные линии на поверхности планеты — марсианские каналы. Конечно, Скиапарелли не был первым, кто увидел каналы: некоторые из них замечали и до него (например, Анджело Секки). Но после Скиапарелли эта тема на многие годы стала доминирующей в изучении Марса.

Наблюдения деталей поверхности Марса, таких как «каналы» и «моря», положили начало новому этапу в изучении этой планеты. Скиапарелли считал, что «моря» Марса действительно могут быть водоемами. Поскольку соединяющим их линиям нужно было дать название, Скиапарелли назвал их «канала-

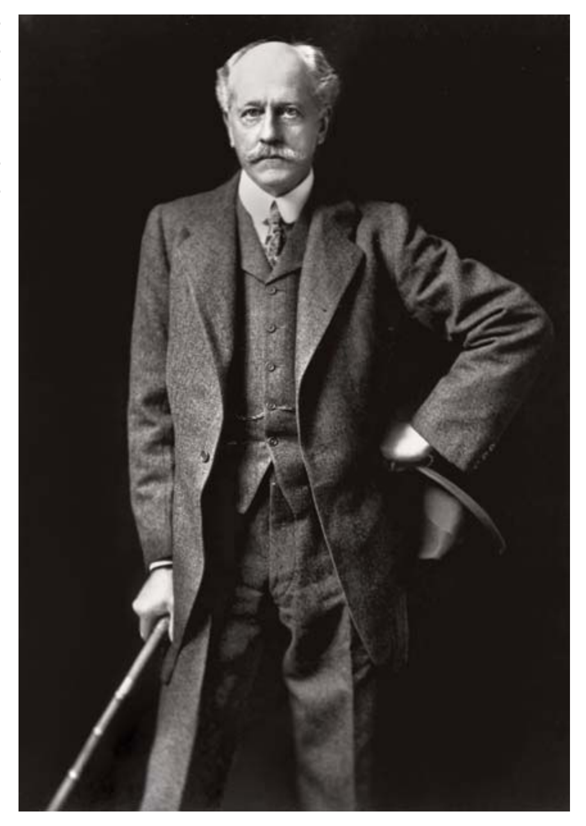


**Рис. 4.41.** Персиваль Ловелл, американкий бизнесмен, дипломат, путешественник и журналист, вдохновленный идеей о марсианских каналах, построил первоклассную обсерваторию для изучения Марса.

ми» (*canali*), подразумевая под этим морские проливы, а отнюдь не рукотворные сооружения. Он полагал, что по этим каналам в приполярных областях в период таяния полярных шапок действительно течет вода. После открытия на Марсе «каналов» некоторые ученые высказали предположение об их искусственной природе, что послужило основанием для гипотез о существовании на Марсе разумных существ. Но сам Скиапарелли не считал эту гипотезу научно обоснованной, хотя и не исключал наличия на Марсе жизни, возможно, даже разумной.

Однако мысль об искусственной системе оросительных каналов на Марсе стала укрепляться в других странах. Отчасти этому способствовало то, что итальянское *canali* было представлено на английском как *canal* (рукотворная водная магистраль), а не как *channel* (природный морской пролив). Да и на русском слово «канал» подразумевает искусственное сооружение. Идея о марсианах увлекла

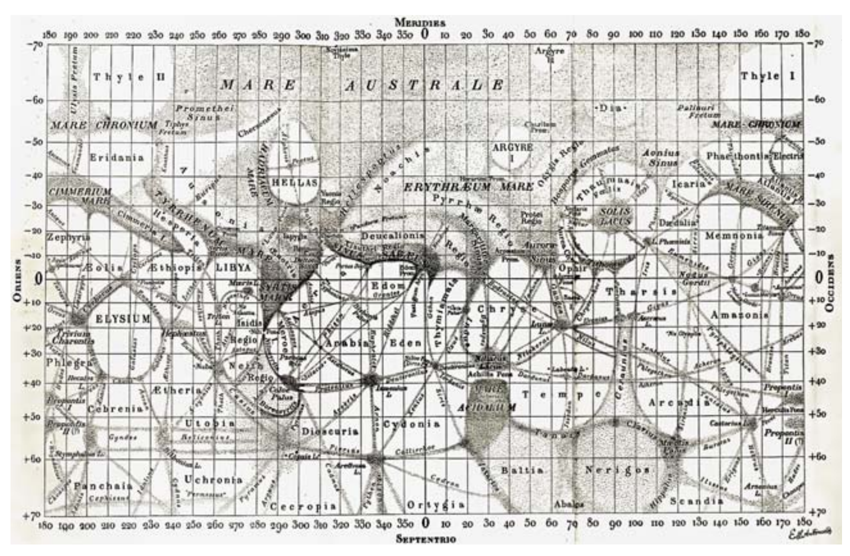



**Рис. 4.42.** Карта Марса с каналами (по Фламмариону и Антониади) из энциклопедического словаря Брокгауза и Ефрона (1910-е гг.).

тогда многих, и не только писателей (вспомним Герберта Уэллса с его «Войной миров», 1897), но и исследователей. Самым известным из них стал Персиваль Ловелл. Этот американец получил прекрасное образование в Гарварде, в равной степени овладев математикой, астрономией и гуманитарными предметами. Но, как отпрыск родовитого семейства, он скорее стал бы дипломатом, писателем или путешественником, чем астрономом. Однако, прочитав работы Скиа-

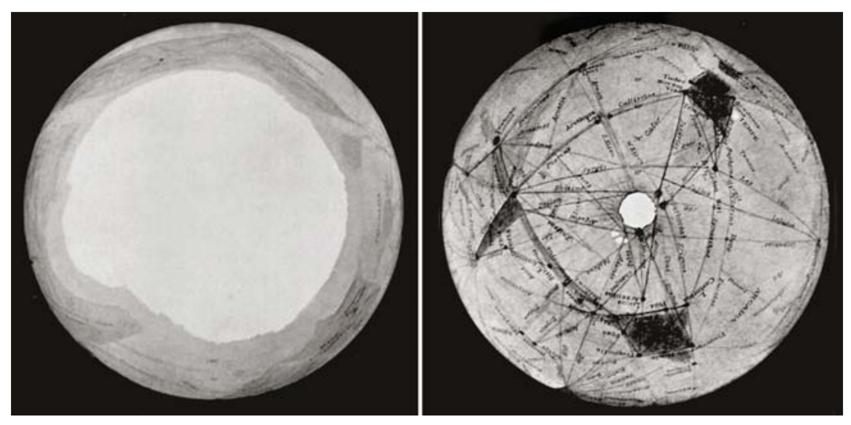


**Рис. 4.43.** Полярные шапки Марса, 1905 г. Рисунки из книги П. Ловелла «Марс как прибежище жизни» (P. Lowell, «Mars as the abode of life», 1908).

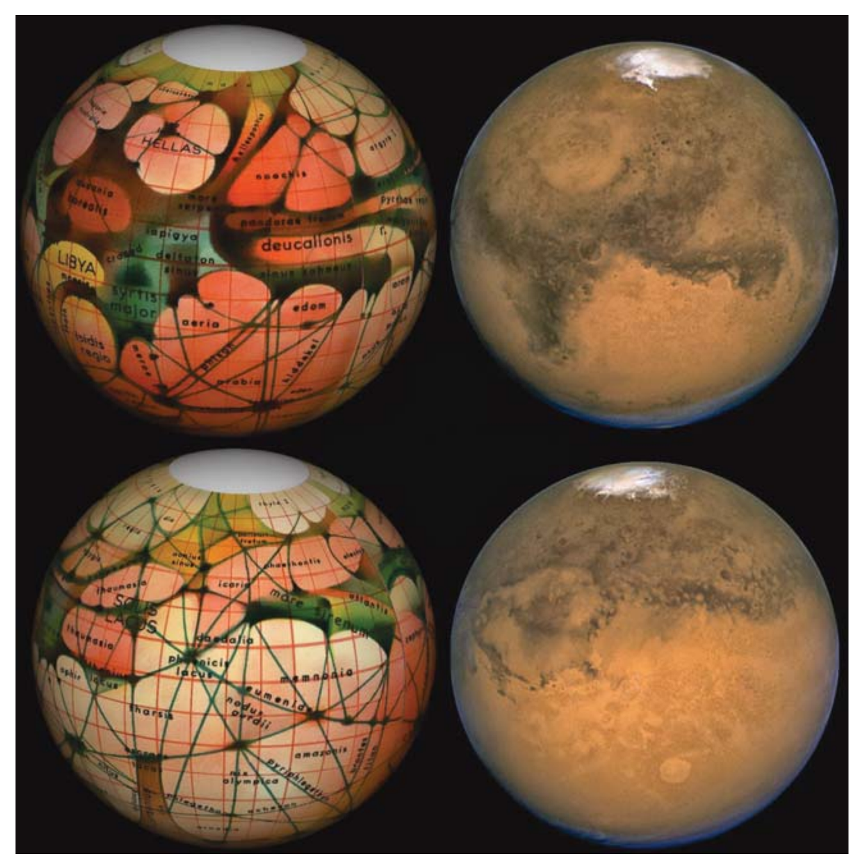



**Рис. 4.44.** **Глобус Марса, сделанный на основе карт XX в, и современные снимки тех же полушарий планеты (космический телескоп «Хаббл»)**

парелли о каналах, он увлекся Марсом и поверил в существование жизни и цивилизации на нем. В общем, он забросил все прочие дела и занялся изучением Красной планеты.

На деньги своего богатого семейства Ловелл построил обсерваторию и начал рисовать каналы. Заметим, что фотография тогда была в зачаточном состоянии, а глаз опытного наблюдателя способен заметить мельчайшие детали в условиях атмосферной турбулентности, искажающей изображения далеких объектов. Карты марсианских каналов, созданные в Ловелловской обсерватории, были самыми детальными. К тому же, будучи хорошим литератором, Ловелл написал несколько занимательнейших книг — «Mars and its canals» (1906), «Mars as the abode of life» (1908) и др. Только одна из них бы-

ла переведена на русский язык еще до революции: «Марс и жизнь на нем» (Одесса: Матезис, 1912). Эти книги увлекли целое поколение надеждой встретить марсиан. Зима — полярная шапка огромная, а каналов не видно. Лето — шапка растаяла, вода потекла, каналы появились. Они стали видны издалека, поскольку по берегам каналов зазеленели растения. Убедительно?

Следует признать, что история с марсианскими каналами так и не получила исчерпывающего объяснения. Есть старые рисунки с каналами и современные фотографии — без них (рис. 4.44). Где каналы?

Что это было? Заговор астрономов? Массовое помешательсто? Самовнушение? Трудно упрекнуть в этом ученых, отдавших жизнь науке. Возможно, разгадка этой истории ждет нас впереди.

А сегодня мы изучаем Марс, как правило, не в телескоп, а при помощи межпланетных зондов (хотя и телескопы до сих пор используются для этого и порой приносят важные результаты). Полет зондов к Марсу осуществляется по самой энергетически выгодной полуэллиптической траектории (см. рис. 3.7 на с. 61). С помощью третьего закона Кеплера легко вычислить длительность такого перелета. Из-за большого эксцентриситета марсианской орбиты время перелета зависит от сезона запуска. В среднем полет с Земли на Марс длится 8–9 месяцев.

Можно ли отправить пилотируемую экспедицию на Марс? Это большая и интересная тема. Казалось бы, для этого нужны лишь мощная ракета-носитель и удобный космический корабль. Достаточно мощных носителей пока ни у кого нет, но над ними работают американские, российские и китайские инженеры. Можно не сомневаться, что такая ракета в ближайшие годы будет создана государственными предприятиями (например, наша новая ракета «Ангара» в своем самом мощном варианте) или частными компаниями (Илон Маск — почему бы и нет).

А существует ли корабль, в котором космонавты проведут многие месяцы по пути к Марсу? Пока такого нет. Все существующие («Союз», «Шэньчжоу») и даже проходящие испытания (Dragon V2, CST-100, Orion) — очень тесные и пригодны лишь для полета на Луну, куда всего три дня пути. Правда, есть идея после взлета надувать дополнительные помещения. Осенью 2016 г. надувной модуль был испытан на МКС и неплохо себя показал.

Таким образом, техническая возможность перелета на Марс скоро появится. Так в чем же проблема? В человеке! На рис. 4.45 указа-

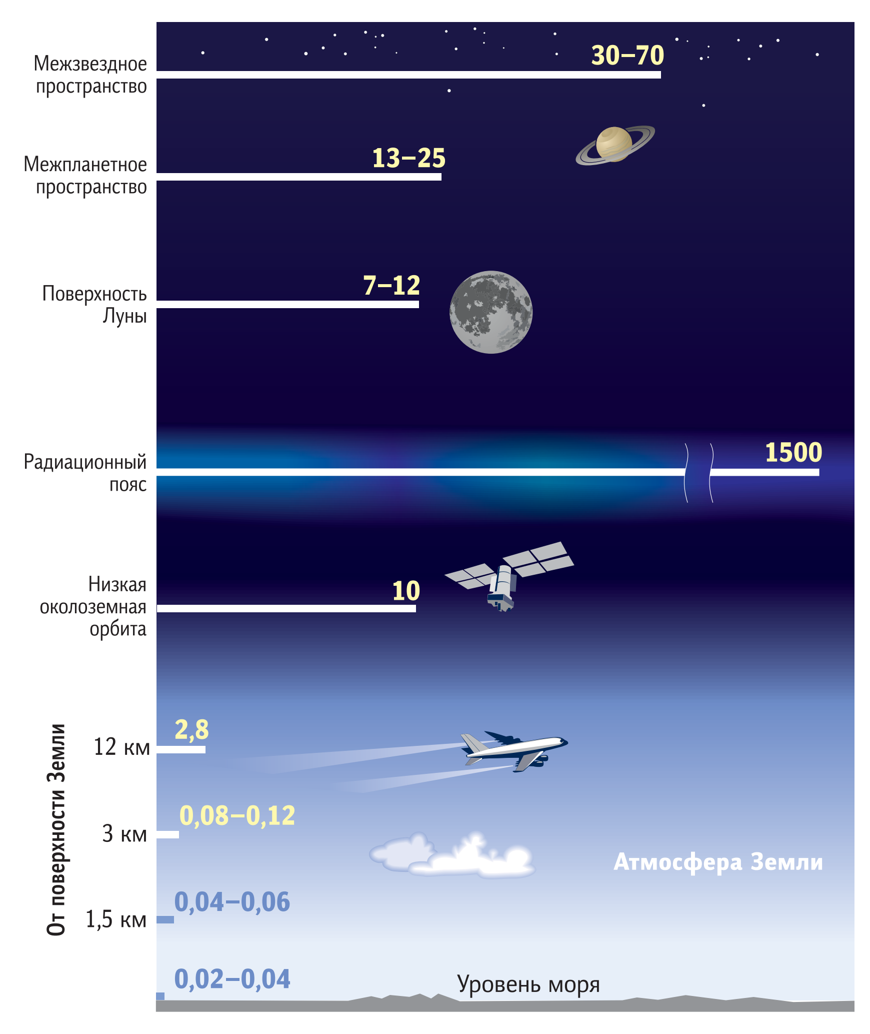



**Рис. 4.45.** **Годовые дозы облучения (в бэр), которые получит человек на различном расстоянии от Земли.**

на годовая доза облучения человека фоновой радиацией в разных местах — на уровне моря, в стратосфере, на околоземной орбите и в открытом космосе. Единица измерения — бэр (биологический эквивалент рентгена). Мы постоянно подвергаемся облучению естественной радиоактивностью земных пород, потоками космических частиц или искусственно созданной радиоактивностью. У поверхности Земли фон слаб: нас защищают, прикрывая нижнюю полусферу, магнитосфера и атмосфера планеты, а также ее тело. На низкой око-

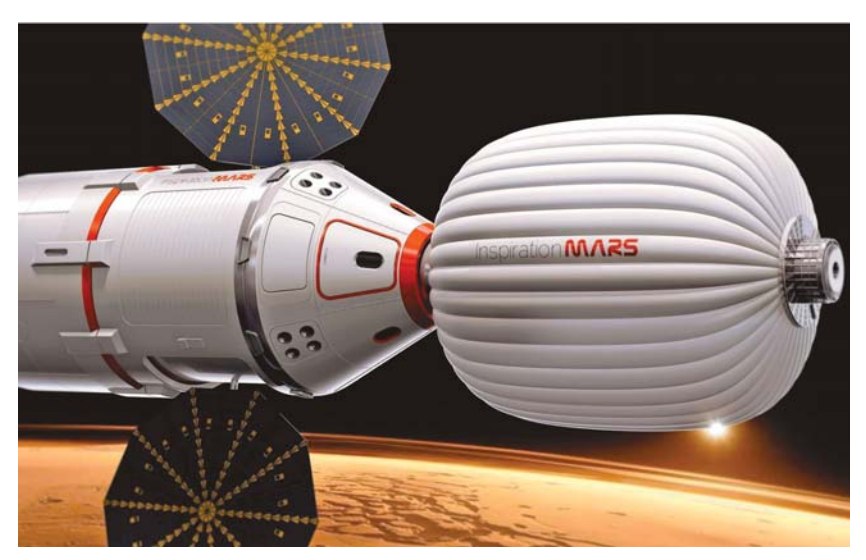



**Рис. 4.46.** Возможно, так будет выглядеть корабль для полета на Марс (проект «Inspiration Mars»).

лоземной орбите, где работают космонавты МКС, атмосфера уже не помогает, поэтому радиационный фон возрастает в сотни раз. В открытом космосе он еще в несколько раз выше. Это существенно ограничивает длительность безопасного пребывания человека в космосе. Отметим, что работникам атомной промышленности запрещается в год получать больше 5 бэр — это почти безопасно для здоровья. Космонавтам в год разрешают получать до 10 бэр (приемлемый уровень опасности), что и ограничивает длительность их работы на МКС одним годом. А полет на Марс с возвращением на Землю в лучшем случае (если не произойдет мощных вспышек на Солнце) приведет к дозе в 80 бэр, что обусловит большую вероятность онкологического заболевания. Именно это и есть главное препятствие для полета человека на Марс.

Можно ли защитить астронавтов от радиации? Теоретически — можно. На Земле нас защищает атмосфера, толщина которой по количеству вещества на 1 см$^2$ эквивалентна 10-метровому слою воды. Легкие атомы лучше рассеивают энергию космических частиц, поэтому защитный слой космического корабля может иметь толщину 5 метров. Но даже в тесном корабле масса этой защиты будет измеряться сотнями тонн. Отправить такой корабль к Марсу не под силу современной и даже перспективной ракете.

**Некоторые варианты защиты от радиации в межпланетном полете**

| Вещество | Характеристики |
|---|---|
| Вода $\mathbf{H_2O}$ | Требуется слой толщиной 5 м. Масса резервуара составит около **500 т.** |
| Полиэтилен $\mathbf{(CH_2)}_n$ | Содержание водорода выше. Резервуар не требуется, но масса вещества — не менее **400 т.** |
| Чистый водород $\mathbf{H_2}$ | Легкий. Требуется массивный герметичный бак. |

Ну хорошо, допустим, нашлись добровольцы, готовые рискнуть своим здоровьем и отправиться на Марс в одну сторону без радиационной защиты. Смогут ли они после посадки там работать? Можно ли рассчитывать, что они выполнят задание? Вспомните, как космонавты, проведя полгода на МКС, чувствуют себя сразу после посадки на землю: их выносят на руках, кладут на носилки, и две-три недели они реабилитируются, восстанавливая крепость костей и силу мышц. А на Марсе их никто на руках не вынесет. Там нужно будет самостоятельно выходить и работать в тяжелых пустотных скафандрах, как на Луне: ведь давление атмосферы на Марсе практически нулевое. Скафандр очень тяжелый. На Луне двигаться в нем было относительно легко, поскольку сила тяжести там составляет $^1/_6$ земной, а за три дня полета к Луне мышцы не успевают ослабнуть. На Марс же космонавты прибудут, проведя многие месяцы в условиях невесомости и радиации, а сила тяжести на Марсе в 2,5 раза больше лунной. К тому же и на самой поверхности Марса радиация почти такая же, как в открытом космосе: магнитного поля у Марса нет, и атмосфера у него слишком разреженная, чтобы служить защитой. Так что кинофильм «Марсианин» — это фантастика, очень красивая, но нереальная.

Как мы себе раньше представляли марсианскую базу? Прилетели, поставили на поверхности лабораторные модули, живем в них и работаем. А теперь вот как: прилетели, окопались, соорудили убежища на глубине минимум 2–3 метра (это достаточно надежная защита от радиации) и стараемся пореже и ненадолго выходить на поверхность. В основном сидим под грунтом и управляем работой марсоходов. Ну так ведь ими и с Земли можно управлять, даже еще эффективнее, дешевле и без риска для здоровья. Что и делается уже несколько десятилетий.

О том, что узнали о Марсе роботы, — в следующей лекции.



# 5 История открытий на Марсе

Запуски космических аппаратов к Марсу начались с 1962 г. Но лишь в 1965 г. мы увидели первые фотоснимки марсианской поверхности с близкого расстояния, переданные аппаратом «Mariner-4» (NASA), пролетевшим мимо. И тех, кто ожидал, что Марс — благоприятное для жизни место, эти изображения «немного» разочаровали: поверхность на первый взгляд напоминает лунную и не обещает никаких перспектив. Метеоритных кратеров на Марсе оказалось много по двум причинам. Одна из них — слабая эрозия, потому что дождей там последний миллиард лет не было, ветер не особенно сильный, так что кратеры сохраняются долго. Да и метеориты падают чаще, потому что Марс находится на внутреннем краю Главного пояса астероидов.

Прошло еще несколько лет, и у Марса появился первый искусственный спутник — «Mariner-9» (рис. 5.1). Он вышел на орбиту, стал летать вокруг планеты, сделал несколько тысяч фотографий, сфотографировал почти всю поверхность — и мы впервые увидели Марс целиком. Он оказался довольно интересен, по меньшей мере для геологов. Так что надо было сажать туда аппарат.

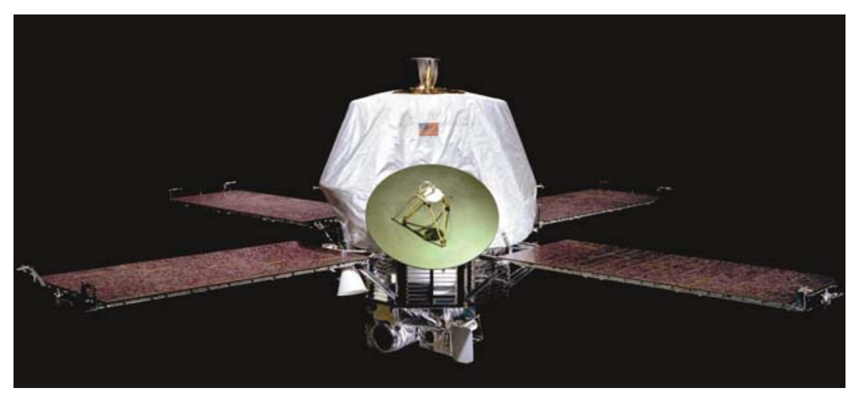


**Рис. 5.1.** «Маринер-9», первый искусственный спутник Марса (NASA).

**Рис. 5.2.** Одна из первых фотографий марсианской поверхности с близкого расстояния (NASA).



Значит, следующий шаг — посадка на планету. Как известно, отечественная электроника не очень надежна: советские аппараты по пути портились и до Марса не долетали. Тогда решили разом запускать по нескольку аппаратов, чтобы долетел хотя бы один из них. И вот в 1971 г. наша страна запустила сразу три таких зонда, по конструкции не очень удачных, но в их составе был посадочный аппарат, капсула для посадки на Марс (рис. 5.3). И один из зондов таки долетел — и даже сел! Так что первая посадка была на Марс была наша, отечественная, инженеры здорово постарались. Конструкция у посадочного аппарата была прочная, на борту у него был первый в истории марсоход; механическая лапка мягко опускала его на грунт, и он должен был ходить по поверхности Марса — не ездить на колесах, а именно ходить, как шагающий экскаватор. Блютусов и вайфаев в ту пору не было, связь с базовой станцией была по проводу — т. е. марсоход должен был ходить, привязанный на проводе, так что далеко бы он в любом случае не ушел. Но насколько далеко он ушел — никто не знает, потому что после выпуска антенн станция проработала всего 10 секунд, потом сигнал по неизвестной причине

**Рис. 5.3.** «Марс-3» (СССР), первый аппарат, совершивший мягкую посадку на Марс.

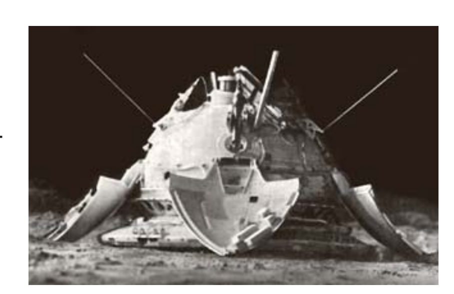




**Рис. 5.4.** Долины Маринера. Снимок представляет собой мозаику из 102 кадров, полученных орбитальным аппаратом «Викинг-1» (NASA, 1980).

поступать перестал. Так что никаких научных данных с поверхности мы тогда не получили.

С тех пор многие страны, прежде всего СССР и США, стали запускать роботов. Удачных экспедиций было немного: половина автоматических аппаратов не долетела (даже в один конец), так что дело это непростое. Американские и европейские зонды были более удачными. Недавно к Марсу прилетел индийский аппарат — и ведь работает до сих пор, уже третий год, хотя техника стран третьего мира нам казалась чем-то второразрядным. Тем не менее индийцы первый раз запустили межпланетный аппарат, и им это удалось. А японцам — не удалось, их космический зонд добрался до Марса, но затормозить не смог и на орбиту не вышел.

**Рис. 5.5.** Облака в атмосфере и полярные шапки Марса (космический телескоп «Хаббл», NASA, ESA).



Итак, для геологов Марс оказался очень интересным. Планета небольшая, сила тяжести там почти втрое меньше, чем на Земле. Ведь сила тяжести выравнивает поверхность (по закону Архимеда), и когда гравитация слабая, разница высот может быть весьма значительной. Поэтому на малых планетах и горы могут вырастать выше, и каньоны образовываться глубже. Так, на Земле максимальная высота гор — около 9 км, а на Марсе — 26 км, хотя плотность и твердость пород примерно одинакова. На нашей планете более высоких гор не построить: даже если на Эверест наложить кирпичей, выше он не станет — избыточной массой гора продавит свое основание.

Марсианские каньоны тоже очень глубоки, до 10 км (рис. 5.4). Один из самых глубоких назвали Долинами «Маринера» — того самого, который впервые сделал его снимок. Длиной он около 4000 км, ширина — почти 800 км, глубина — около 7 км. Правда, на Земле самое глубокое место — Марианская впадина — примерно такой же глубины, но это благодаря тому, что она заполнена водой.

Как и у нашей планеты, у Марса есть две полярные шапки (рис. 5.5). Весной солнышко пригревает (до −80 °C), полярная шапка под его лучами начинает интенсивно таять, так как она в основном состоит из двуокиси углерода. Он испаряется в атмосферу и замерзает на другом полюсе, который в тени. В результате огромное коли-

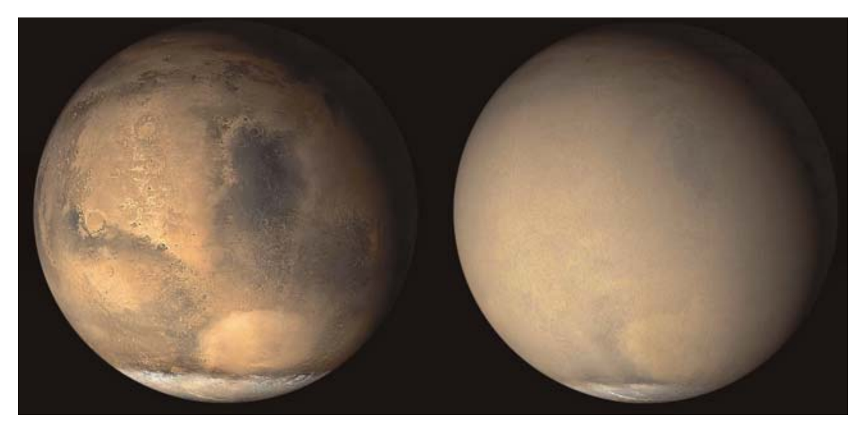


**Рис. 5.6. Два снимка Марса, полученные в 2001 г. аппаратом «Mars Global Surveyor». Слева — фото, сделанное в конце июня (четко видна поверхность планеты), справа — в июле, когда Марс был окутан пылевой бурей (NASA/JPL/MSSS).**

чество $CO_2$ устремляется через всю планету по меридианам из одного полушария в другое, этот ветер поднимает массу пыли и тем самым вызывает пылевую бурю: хотя атмосфера Марса разреженная и сила тяжести на его поверхности небольшая, даже такая атмосфера может создать мощный воздушный поток, который способен поднять пыль (рис. 5.6). И так повторяется дважды в год (марсианский, который почти вдвое длиннее земного). «Маринеру-9» в этом отношении не повезло: он подлетел, начал фотографировать а тут вдруг бах — пылевая буря. Прошло лишь полтора месяца с начала весны — и пыль, поднятая ветром, заволокла всю поверхность. Четыре земных месяца зонд дожидался окончания пылевой бури, чтобы продолжить свою работу.

Сегодня вокруг Марса работает много зондов. Самый совершенный из них — американская (NASA) межпланетная станция Mars Reconnaissance Orbiter (MRO, рис. 5.7). У нее мощный фотографический комплекс с большим телеобъективом, который позволяет получать фотоснимки поверхности планеты с линейным разрешением в четверть метра (т. е. детали такого размера могут быть различимы): например, на его снимках видны следы колес марсоходов. Эта орбитальная станция по радиоканалу передает информацию на Землю, причем не только собственную, но также ретранслирует с поверхности планеты сигналы марсоходов, когда пролетает над ними.

Карты марсианского рельефа на сегодня более детальны, чем карты земной поверхности. На нашей планете мешают облака, веч-



**Рис. 5.7.** **Межпланетная станция Mars Reconnaissance Orbiter. Рисунок NASA.**

нозеленые тропические леса. Кроме того, две трети поверхности нашей планеты покрыты водой, сквозь которую не видно ничего на дне. А на Марсе воды нет, облаков мало, зелени нет, поэтому его внешний вид мы знаем идеально. И даже внутри кое-что прощупали. Физикам известно, что любая волна проникает внутрь тела на расстояние порядка длины этой волны. MRO имеет в распоряжении радиолокаторы, в том числе и длинноволновые (порядка километра). И его снимки Марса показывают много интересных деталей.



**Рис. 5.8.** **Марсианский ледник в процессе таяния (NASA).**

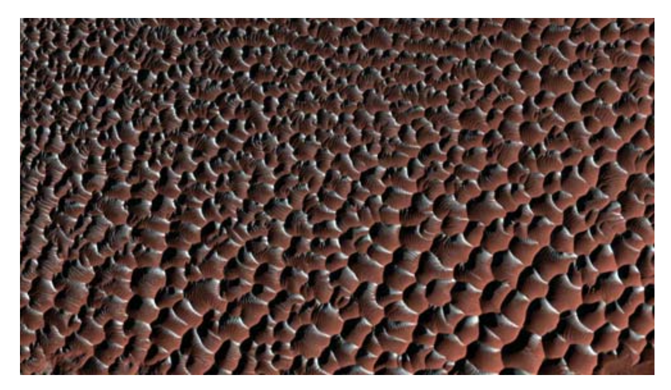


**Рис. 5.9.** Удивительный марсианский рельеф. Размер изображения по диагонали — около 1 км.

Как правило, эти детали узнаваемы и имеют аналоги в земном рельефе. Например, вот следы таяния полярной шапки (рис. 5.8); на ледниках Эльбруса точно такие же слои, для геологов очень знакомые структуры.

Казалось бы, а что может быть на Марсе не такое, как на Земле? Но вот эта картина (рис. 5.9) — не очень знакомая: похоже на чешую или черепицу. Интересно, что скажут специалисты-геологи: есть ли такое у нас? Или вот (рис. 5.10) — песчаные дюны: ветер дует, песок переносится. Но тут светлый песок отделился от темного: дюны из черного песка, а подстилающая поверхность — из более светлого. На спутниковых снимках Земли такого сочетания мне видеть не приходилось, хотя черный песок есть на Канарских островах, это вулкани-



**Рис. 5.10.** Дюны из черного базальтового песка в марсианском кратере Проктор (NASA).

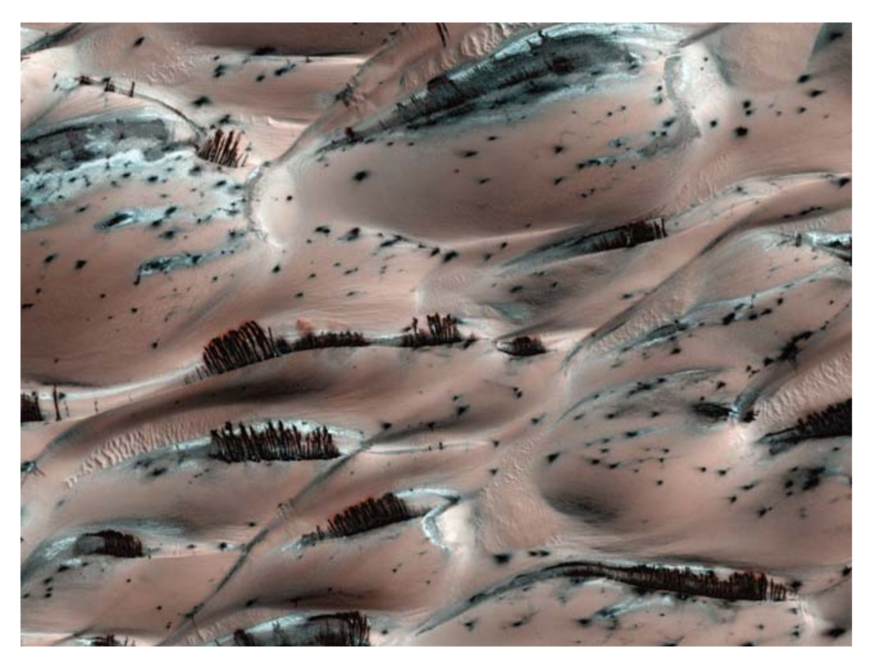


**Рис. 5.11.** Темные оползни на Марсе, сверху напоминающие живые растения.

ческое вещество: лежишь на пляже — ты белый, а он черный. Еще пример космической съемки с орбиты (рис. 5.11): из красноватого песка вроде бы торчат кустики.

Марс вдвое меньше Земли, но все равно площадь поверхности планеты огромна, а марсоходы излазили в сумме лишь около 10 км$^2$ и ничего подобного не обнаруживали.

### Марсианская вода

В полярной шапке вода, конечно, есть, но по тому, как интенсивно шапка тает под солнцем, мы понимаем, что ее там очень мало, в основном вещество шапки — это двуокись углерода, которая при низком марсианском давлении испаряется при −120 °C. Однако мы видим следы водных потоков, явные речные русла, сеть притоков, размытые овраги (рис. 5.12): что-то там все же текло! Судя по всему, на Марсе было даже море, целый океан: в северном полушарии планеты поверхность очень ровная, вся выглажена, как у нас морское дно, и она ниже среднего уровня высоты метров на триста. Но куда вся эта вода делась? Наверное, часть замерзла, а часть испарилась. Но не вся же? Или вся?

Итак, следов течения много, но жидкой воды нигде не видно. А дело в том, что чистой жидкой воды на поверхности Марса быть не может. В прошлом давление марсианской атмосферы, по-видимому, было довольно высоким, но в нашу эпоху в среднем оно в 160 раз меньше земного — около 0,006 атм (на вершине горы Олимп 0,003 атм, а в долине Эллада 0,016 атм). А поскольку атмосфера Марса в основном состоит из углекислого газа, парциальное давление водяного пара в ней еще значительно меньше, т. е. существенно ниже давления, определяющего так называемую тройную точку на фазовой диаграмме воды, в которой сходятся линии плавления льда и испарения жидкой воды. При давлении ниже, чем у тройной точки, чистая вода при любой температуре может устойчиво пребывать лишь в двух агрегатных состояниях — льда и пара. Лед мы видим в полярных шапках, пар тоже есть — о его присутствии в атмосфере говорят облака. А жидкой воды нет. Правда, на снимках с орбиты на некоторых склонах гор и оврагов видны следы «ручейков». Возможно, иногда под лучами весеннего солнца из слоев вечной мерзлоты вытекают крепкие рассолы перхлоратов, температура замерзания которых существенно ниже, чем у чистой воды: вот их следы и



**Рис. 5.12. Следы водной эрозии на Марсе. Вероятно, весной лед тает и вода стекает по склону, быстро испаряясь. Источник: NASA/JPL-Caltech/Univ. of Arizona.**



**Рис. 5.13.** Вероятно, по весне вода оттаивает из обнажившегося ледника и стекает в моментально замерзающее озерцо (источник: Malin Space Science Systems, MGS, JPL, NASA).

обнаружены. Но постоянных водных потоков нет. Значит, часть воды замерзла и лежит в вечных полярных шапках и слоях вечной мерзлоты, а другая часть испарилась и улетела в космос. Но почему она улетела? Ведь с Земли-то вода практически не улетает!

У нашей планеты есть магнитное поле, которое довольно надежно защищает нас от потоков солнечной плазмы. Из-за магнитного поля этот солнечный ветер с атмосферой Земли практически не взаимодействует: заряженные частицы плазмы облетают Землю вдоль силовых линий поля и уходят вдаль. А у Марса нет магнитного поля: ядро Марса застыло, и в нем нет конвективных потоков электропроводящего материала, которые создавали бы магнитное поле. И солнечный ветер постепенно сносит атмосферу Марса (и воду в ней) за собой, так что к настоящему времени она уже почти полностью потеряна. Солнце высушило Марс.

Но есть надежда, что не вся вода высохла. Часть замерзла и осталась под поверхностью. Раньше мы могли лишь догадываться об этом, а теперь есть наглядные свидетельства. Вот край каньона (рис. 5.13): видны какие-то струйки, потоки. Может быть, это водяной лед из слоев мерзлоты тает по весне? Или, может быть, это струйки песка? Но песок осыпáлся бы и с поверхности, а тут бороздки начинаются с глубины около 100 м. Значит, скорее всего, это оттаивает слой мерзлоты. По весне ручейки скатываются вниз — и что мы тут видим? Везде поверхность щербатая, а здесь абсолютно ровная, застывшая, как каток. Если, как выяснилось, каналов марсиане не делают, то вот такие ванны для сбора весенних ручьев они, видимо, все-таки строят — иначе кто же сделал этот бортик? Его построила сама природа: вода, замерзая, надстраивает такие стенки. Похожее явление есть в Памуккале (Турция): когда вода испаряется, соли из рассола выпадают в этом месте и постепенно образуют такие стенки.

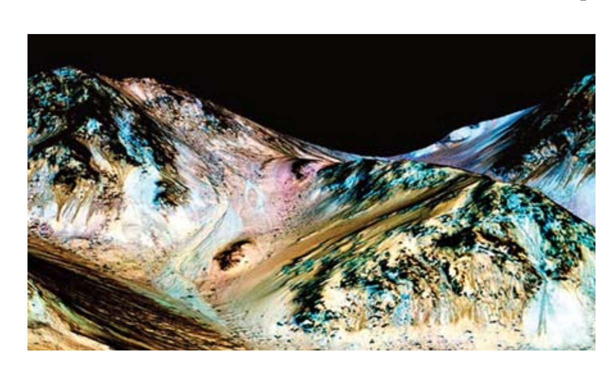


**Рис. 5.14. Химическое разнообразие марсианской поверхности. Оттенки цвета соответствуют разному минеральному составу. Фото: NASA.**

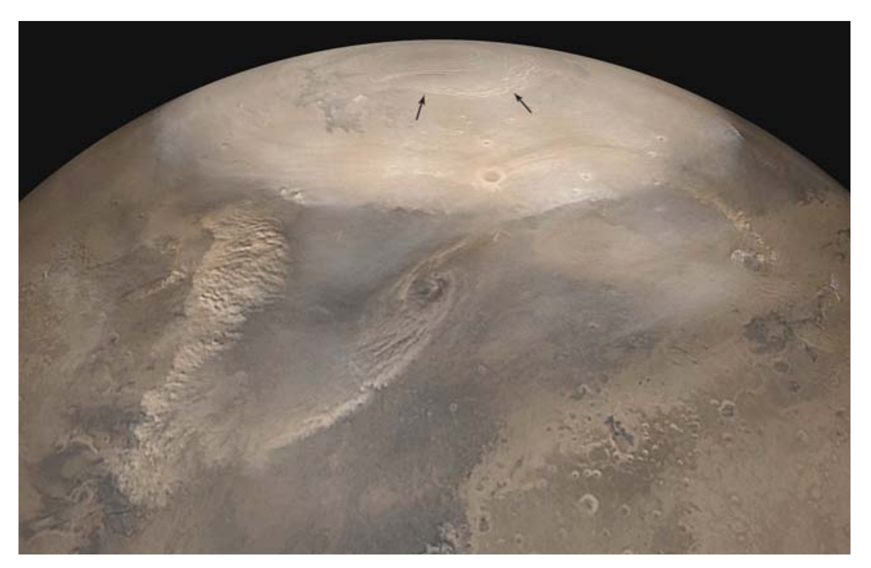


**Рис. 5.15.** В марсианской полярной шапке различимы два слоя: вокруг внутренней части из вечного водяного льда зимой образуется кольцо из затвердевшей углекислоты (граница отмечена стрелками).

Американцы в октябре 2015 г. видели с орбиты тоже лишь следы текшего рассола. На фотографии, полученной зондом «Mars Reconnaissance Orbiter» (рис. 5.14), разным цветом обозначен разный химический состав; вдоль «ручейков» обнаружены перхлораты. Скорее всего, это следы воды, которая содержала растворимые соли хлорной кислоты. СМИ нам преподнесли это открытие в духе «Ура! Там есть вода, должна быть жизнь». Но подумайте, могла ли в такой воде быть жизнь? Ведь соли окисленного хлора — это мерзкая вещь, убийственная для белковой жизни. Ими унитазы чистят в целях дезинфекции, потому что они всё разъедают. Где-то в Калифорнии есть ядовитое озеро с похожим химическим составом, и микробы там приспособились, но одно дело приспособиться, а другое — зарождение жизни в такой среде. Лично у меня эта информация энтузиазма не вызывает.

Замерзшая вода, скорее всего, осела в полярной шапке. На фото (рис. 5.15) видна четкая граница между внешней и внутренней частями шапки. По весне внешняя тает, а внутренняя на протяжении всего лета сохраняется. Вероятнее всего, наружное кольцо — углекислота, а во внутреннем круге лежит вода в виде вечного льда, который не тает и не возгоняется, потому что там круглый год низ-

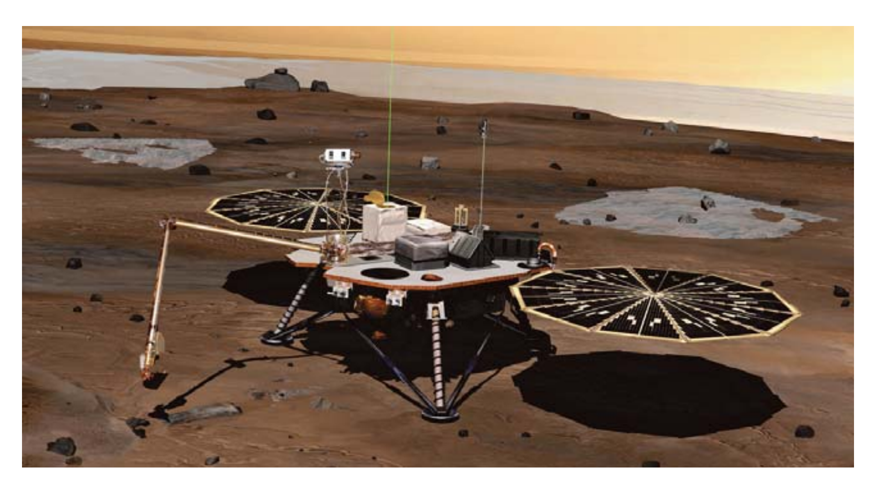


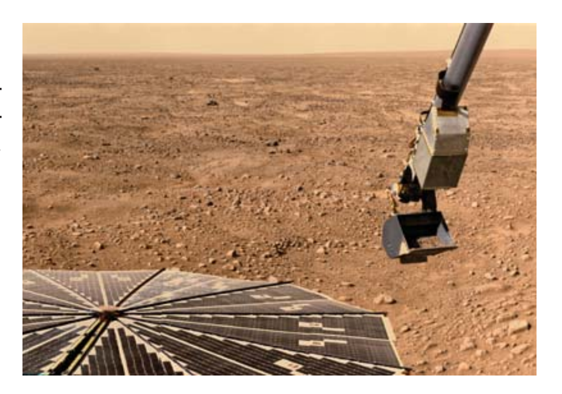
**Рис. 5.16.** Американский зонд Phoenix был посажен внутри области зимней полярной шапки (рисунок NASA).

кая температура. Чтобы это проверить, в 2009 г. NASA забросило туда зонд «Phoenix» (рис. 5.16), он сел на внешнее кольцо летом, т. е. во время полярного дня, полгода работал, а как только солнце зашло — замерз. Но кое-что полезное сделать он успел. Вот внешний вид полярной области Марса в сравнении с канадской тундрой (рис. 5.17):



**Рис. 5.17.** При неоднократном оттаивании и последующем замерзании полярного грунта на Марсе (слева) и на Земле (справа) образуются похожие структуры.

**Рис. 5.18.** **Панель солнечной батареи и ковш «экскаватора» зонда Phoenix, расположенный на роботизированной руке-манипуляторе аппарата. Источник: NASA/JPL-Caltech/University of Arizona/Texas A&M University.**



различий почти нет, структура поверхности одинакова, потому что летом грунт оттаивает, зимой замерзает — и возникающие при этом конвективные потоки вещества приводят к формированию полигональных структур наподобие пчелиных сот.

У зонда «Phoenix» был манипулятор, чтобы копать ямки (рис. 5.18), и кое-что интересное он для нас накопал. Выкопал ковшиком канавку, а там — что-то белое: может быть, соль, может быть, вода, может быть, $CO_2$. Но через несколько дней, в течение которых солнце пригревало канавку, картина стала иной: совсем немного белого вещества испарилось (рис. 5.19). Значит, лед? Скорее всего, так. Потому что углекислота испарилась бы полностью, а соль осталась бы вся. Таким образом, на глубине всего 10 см докопались до водяного льда. Для будущих космонавтов это весьма приятное открытие: если мучит жажда, то взял лопату, копнул — и вот тебе вода. Растопил ее — и пей, если не боишься перхлоратов. Но в полярных районах их, ско-

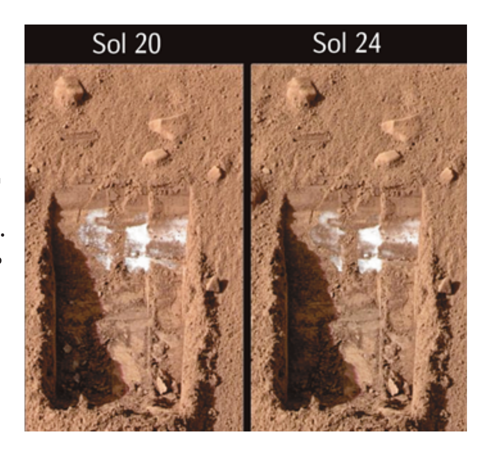



**Рис. 5.19.** **В марсианском грунте под растаявшей летом полярной шапкой было обнаружено белое вещество. Через несколько земных дней очень небольшая его часть растаяла.**



**Рис. 5.20.** Марсоход Sojourner определяет химический состав марсианского камня при помощи альфа-спектрометра. Фото сделано с посадочной платформы PathFinder.

рее всего, нет, потому что они осаждаются, когда вода высыхает, а на полюса летит водяной пар без солей, при конденсации которого получается чистый лед, практически дистиллят, подобно тому как у нас дождевая вода совсем пресная.

Итак, вода на Марсе есть, но на вопрос о наличии жизни ответить гораздо сложнее. Дело не только в химии: на поверхности планеты очень мощная радиация, а жизнь ее «не любит».

Для геологического исследования Марса на него в 1997 г. опустился марсоход «PathFinder» (NASA) с небольшим марсоходом «Sojourner» (рис. 5.20). Колесики у него были маленькие, так что далеко уйти по пересеченной местности он не мог, но и в доступной ему окрестности хорошо поработал. Он прижимал свои приборы (альфа- и гамма-спектрометры) к камешкам и анализировал химический состав горных пород.

Другие два геологических марсохода — «Spirit» и «Opportunity» (рис. 5.21). Первый из них проработал 6 лет, потом увяз в песчаных



**Рис. 5.21.** Геологические марсоходы Spirit и Opportunity были отправлены на Марс в 2003 г. (рисунок NASA).

**Рис. 5.22.** Марсианский «внедорожник» Curiosity, работающий на ядерном топливе. «Автопортрет» аппарата, снятый его собственной камерой (штанга камеры не видна благодаря комбинации нескольких кадров).



дюнах и вышел из строя, а второй работает уже 12 лет без ремонта, хотя на столь долгий срок никто не надеялся — хотя бы потому, что питается он исключительно солнечной энергией, и пылевые бури должны были засыпать солнечные панели, лишив аппарат электричества. Так оно и произошло — но потом дунул сильный ветер, очистил фотоэлементы от пыли, и они снова начали функционировать. И так случалось уже несколько раз, так что ветер на Марсе оказался очень полезным.

Самое лучшее, что мы (точнее, NASA) имеем сегодня на Марсе, — огромная машина «Curiosity» (рис. 5.22), посаженная в 2012 г. Внедорожник с 21-дюймовыми колесами, весом почти в тонну (на Земле), с великолепным источником питания: у него нет солнечных батарей, зато есть ядерный реактор, в котором плутоний-238, распадаясь, греет термоэлементы, и они в результате эффекта Пельтье дают электричество. Этого ядерного источника энергии хватит на десятки лет. Для отбора образцов у аппарата есть манипулятор — штанга двухметровой длины. Но это не предел расстояния, на котором он может анализировать материалы. У него есть уникальная штука — инфра-

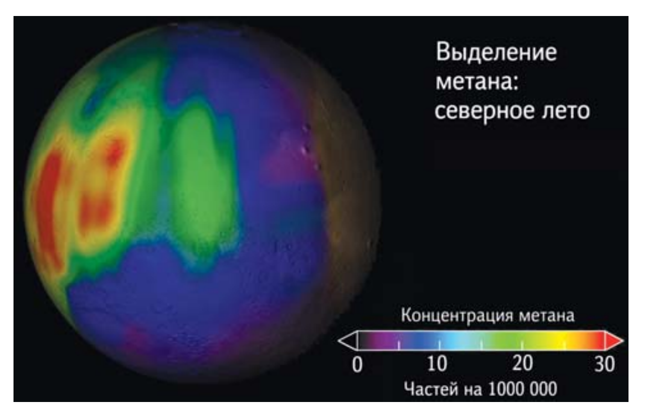



**Рис. 5.23.** В атмосфере Марса обнаружен метан в концентрации до 0,003%.

красный лазер, который «стреляет» многоджоулевыми импульсами, испаряя породу. Раскаленный пар (точнее, облачко плазмы) излучает, телескоп собирает это излучение, спектрометр его анализирует. Таким образом, этот аппарат может издали сканировать своим «лучевым оружием» вертикальную стенку в тех местах, куда «рука» не дотягивается.

В его арсенале имеется и один российский прибор, сделанный в Институте космических исследований (Москва). Это нейтронный детектор для поиска воды под поверхностью Марса. Встроенный в него источник испускает поток нейтронов, который проникает в грунт на глубину более метра. Если нейтроны встречают на пути атомы водорода (которые входят в состав молекулы воды), то они ими рассеиваются и обратно не «отскакивают». Если же легких ядер там нет, то нейтроны частично отражаются назад.

Самое интересное открытие в поисках жизни на Марсе — то, что в 2009 г. наземные телескопы обнаружили в атмосфере планеты спектральные линии метана (рис. 5.23). Метан — это продукт либо вулканических извержений, либо жизнедеятельности каких-то организмов (у нас, например, крупный рогатый скот его выделяет в больших объемах). Но марсианские вулканы давно замерзли и ничего из себя уже не выбрасывают. Значит, остается единственной вторая гипотеза. Правда, ни одной коровы на Марсе пока не замечено, но это могут быть микроорганизмы, разлагающие органические материалы, — скорее всего, микробы, которые зарылись глубоко в грунт, чтобы радиация их не убила. На нашей планете от солнечной и космической радиации защищает атмосфера, поэтому, чтобы сделать простую оценку глубины, на которой достигается хорошая защита от

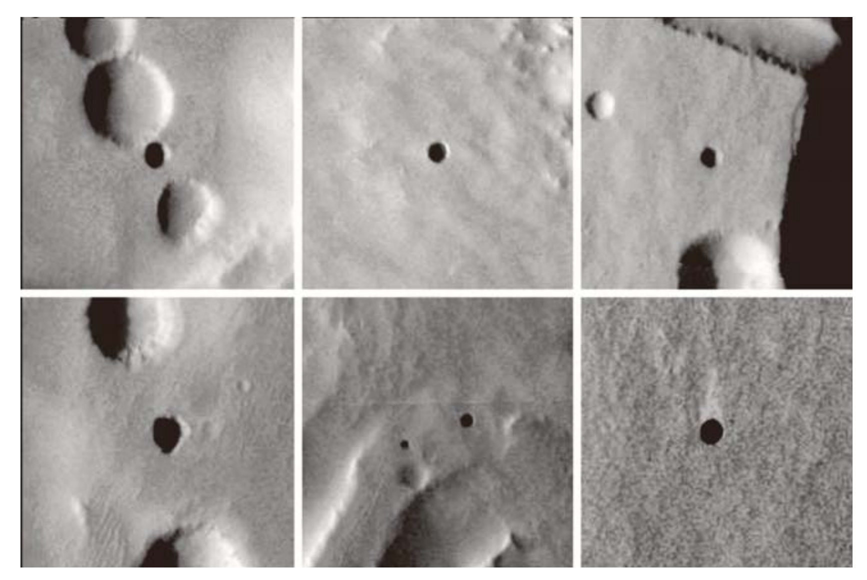


**Рис. 5.24.** Почти круглые отверстия в марсианской поверхности, диаметром от 100 до 250 м, сфотографированные орбитальными аппаратами Mars Odyssey и Mars Global Surveyor (NASA). Съемки в инфракрасном диапазоне, показывающие разность дневных и ночных температур, подтверждают предположение, что они могут быть входами в подземные полости. Источник: NASA/JPL-Caltech/ASU/USGS.

радиации, можно мысленно сжать всю толщу земной атмосферы до плотности грунта — получится несколько метров, меньше пяти.

И ведь с искусственных спутников Марса уже обнаружены входы в марсианские пещеры (рис. 5.24, 5.25). Эти дырки-шахты, вертикальные колодцы, довольно широкие, размером со стадион, на льду выделяются очень контрастно. По-видимому, они имеют карстовое происхождение.



**Рис. 5.25.** Один из провалов в марсианском грунте, возможно, карстовой природы (NASA/ Jet Propulsion Laboratory/University of Arizona).



**Рис. 5.26.** Карстовый провал в земном грунте (Гватемала, 2010 г.).

На нашей планете тоже встречаются такие входы в подземелье (рис. 5.26); недавно такую воронку обнаружили на Таймыре. Карстовые явления на Земле — это когда вода вымывает в глубинном слое грунт, образуется сеть пещер, потом где-то обваливается «крыша» и таким образом получается вход в пещеру. Вулканическая лава тоже могла проплавить внутренние горизонты. А в пещерах условия для жизни очень хорошие. Есть одна такая пещера во Франции (рис. 5.27): на поверхности жизни почти нет — одни туристы, но внутри жизнь просто буйствует, потому что там и влажность выше, и температура стабильнее (нет суточных перепадов), и радиация еще меньше, чем наверху. Отверстие диаметром метров 60 сначала уходит вертикально вниз до глубины 70 м, потом ход становится горизонтальным. Это обычный карстовый коридор, в котором обвалился потолок. Есть надежда, что и на Марсе явление то же самое, т. е. под грунтом имеются пустые пространства, и они наиболее благоприятны для развития жизни. Но изучить их не представляется возможным, потому что роботов-спелеологов пока не создали: роботы могут лишь бегать по поверхности и летать в атмосфере.

Конечно, для существования жизни пещеры не обязательны, живые организмы могут обитать и в грунте. Так, все пространство зем-




**Рис. 5.27.** Схематичный продольный разрез пещеры Gouffre de Padirac (Франция).



**Рис. 5.28.** Карстовая пещера Gouffre de Padirac (Франция). На стенах колодца буйствует жизнь. Фото В. Г. Сурдина.

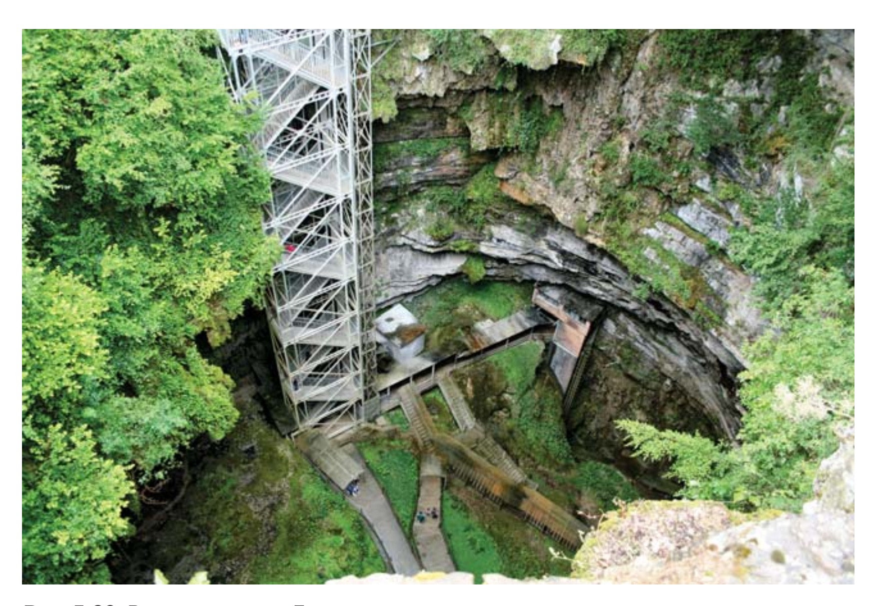


**Рис. 5.29.** Внутри пещеры. Диаметр этого колодца примерно соответствует марсианским. Но их происхождение может быть разным: на Земле «работает» вода, а на Марсе могла действовать вулканическая лава. Фото В. Г. Сурдина.



**Рис. 5.30.** На этом снимке, сделанном марсоходом «Curiosity», отчетливо видны следы действия воды. Марсоход находится на дне бывшего водоема.

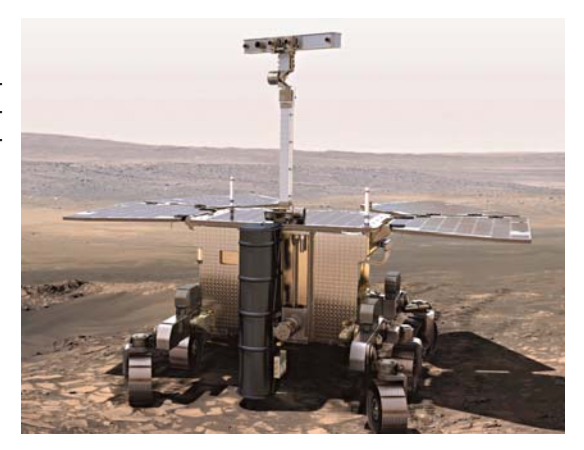
ной коры до глубины в 3 км населено микробами (глубже температура становится выше 100 °С и закипает вода). По оценкам специалистов, полная биомасса микробов под поверхностью земли должна намного превышать массу всех существ на поверхности (на суше и в воде) — включая китов, слонов, людей и др. Можно сказать, что земная жизнь (как и марсианская, если она есть) сосредоточена в основном в глубине плотного грунта.

В рамках миссии марсохода «Curiosity» был задуман замечательный биологический эксперимент: аппарат должен был выкапывать с глубины песок, засыпать его в баночку, заливать питательным раствором и далее смотреть, насколько активно марсианские микробы будут там размножаться. Но, к сожалению, емкость с этим раствором разбилась при посадке. Это был единственный эксперимент среди запланированных для «Curiosity», который не удалось выпол-



**Рис. 5.31.** Панорама горы Шарп — цели исследований марсохода Curiosity. Фото сделано камерой марсохода (NASA).

**Рис. 5.32.** Марсоход по проекту ExoMars (ESA/Роскосмос), предназначенный для биохимического исследования подповерхностного грунта.



нить. Итак, жизнедеятельность микробов он увидеть не сможет, но у него есть действующий масс-спектрограф, который способен обнаруживать в пробах грунта биомолекулы нуклеиновых кислот и белков, хотя это даст лишь косвенное подтверждение возможности жизни на планете.

Но пока «Curiosity» занимается лишь геологией. Посадили его внутри обширного метеоритного кратера около большой (5 км высотой) центральной горы (рис. 5.31). Она сложена осадочными породами, которые наслаивались век за веком, и эту «геологическую летопись» Марса за последние пару миллиардов лет геологи мечтают изучить. Сейчас марсоход уже подъехал к подножию этой горы, и ближайшая его задача — подниматься на нее, пока сможет. Это непросто: марсианские камешки оказались весьма острыми и оставляют дырки в алюминиевых колесах робота. Из-за полученных повреждений движется он небыстро, тем более что ведут его не по прямой, а в обход камней, так что доберется ли он до самой вершины — неизвестно.

Космонавты на Марс если и полетят когда-нибудь, то не скоро, так что пока будем исследовать его роботами. Очередной проект по исследованию Марса, «ExoMars», изначально задумывался как европейско-американский, но в 2013 г. американцы отказались от него и прекратили финансирование, европейцам (ESA) для его продолжения своих денег не хватило, и они предложили участвовать России. Согласно проекту, Роскосмос предоставляет ракеты, посадочную платформу и некоторые приборы, а ESA создает спутник, спускаемый аппарат «Скиапарелли» и марсоход. Первая часть программы уже реализована. Ракета «Протон-М» с разгонным блоком «Бриз-М»

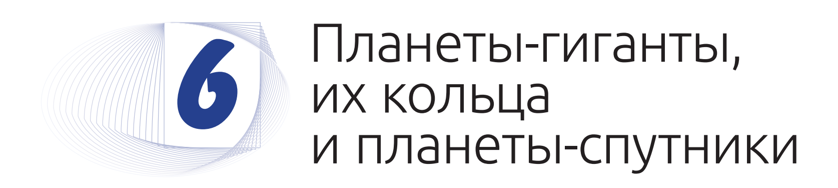
14 марта 2016 г. отправила к Марсу экспедицию, которая 19 октября 2016 г. прибыла к Красной планете. Посадка «Скиапарелли» прошла неудачно — аппарат разбился. Спутник «Trace Gas Orbiter» вышел на орбиту и нормально работает, изучая малые компоненты марсианской атмосферы (особый интерес представляет метан).

В конце 2018 г. на Марс должен опуститься стационарный аппарат «InSight» (NASA), внешне похожий на «Phoenix» (см. с. 138), но с более интересным набором приборов. В частности, он должен установить на грунте сейсмометр и, просверлив грунт, опустить на глубину около 5 м датчик для измерения теплового потока из недр планеты.

Вторая часть российско-европейской экспедиции «ExoMars» планировалась на 2018 г., но теперь перенесена на 2020 г. Российская посадочная платформа должна доставить на поверхность шестиколесный марсоход массой 270 кг, оборудованный бурильным станком, способным добыть грунт с глубины 1,5–2,0 м. На марсоходе будет комплект приборов для минерального и химического анализа этого грунта. Специальные методы будут использованы для обнаружения биомаркеров.

Так что ждем новых открытий.





# 6 Планеты-гиганты, их кольца и планеты-спутники

## Гигантские планеты — какие они?

Наша Солнечная система, если иметь в виду ее вещество, состоит из Солнца и четырех планет-гигантов, а еще проще — из Солнца и Юпитера, поскольку масса Юпитера больше, чем всех прочих околосолнечных объектов — планет, комет, астероидов — вместе взятых. Фактически мы живем в двойной системе Солнце—Юпитер, а вся остальная «мелочь» подчиняется их гравитации.

Сатурн вчетверо меньше Юпитера по массе, но по составу похож на него: он тоже в основном состоит из легких элементов — водорода и гелия в отношении 9 : 1 по количеству атомов. Уран и Нептун еще менее массивны и по составу богаче более тяжелыми элементами — углеродом, кислородом, азотом. Поэтому группу из четырех гигантов обычно делят пополам, на две подгруппы: Юпитер и Сатурн называют газовыми гигантами, а Уран и Нептун — ледяными гигантами. Дело в том, что Уран и Нептун обладают не очень толстой атмосферой, а бóльшая часть их объема — это ледяная мантия, т. е. довольно твердое вещество, а у Юпитера и Сатурна почти весь объем занят газообразной и жидкой «атмосферой». При этом все гиганты имеют железно-каменные ядра, превышающие по массе нашу Землю.

На первый взгляд, планеты-гиганты примитивны, а маленькие планеты земного типа намного интереснее. Но, может быть, это просто потому, что мы пока плохо знаем природу этих четырех гигантов. Например, к двум ледяным гигантам — Урану и Нептуну — за всю историю астрономии приближался лишь зонд «Вояджер-2» (NASA), да и то пролетел, не останавливаясь, мимо них: в 1986 г. — мимо Урана и в 1989 г. — мимо Нептуна. Много ли он мог увидеть и измерить? Можно сказать, что к исследованию ледяных гигантов мы еще по-настоящему не приступали.

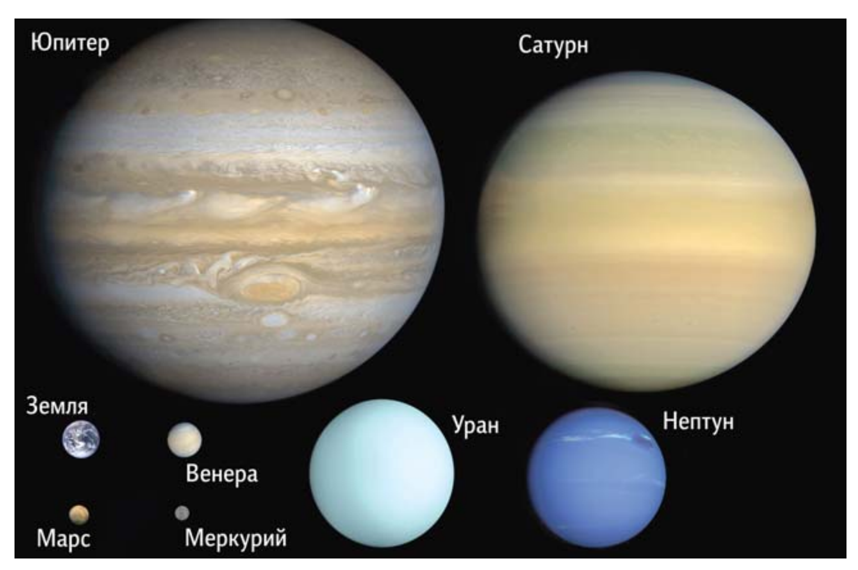



**Рис. 6.1.** Относительные размеры планет Солнечной системы.

Газовые гиганты изучены намного детальнее, поскольку кроме пролетных аппаратов («Пионер-10 и 11», «Вояджер-1 и 2», «Улисс», «Кассини», «Новые горизонты», NASA и ESA) рядом с ними длительно работали искусственные спутники: «Галилео» (NASA, 1995–2003) и «Джуно» (NASA, с 2016 г.) исследовали Юпитер, а «Кассини» (NASA и ESA, 2004–2017) изучал Сатурн.

Наиболее глубоко был исследован Юпитер, причем в прямом смысле: в его атмосферу с борта «Галилео» был сброшен зонд, который влетел туда со скоростью 48 км/с, раскрыл парашют и за 1 час опустился на 156 км ниже верхней кромки облаков, где при внешнем давлении 23 атм и температуре 153 °C прекратил передавать данные — по-видимому, из-за перегрева. На траектории спуска он измерил многие параметры атмосферы, включая даже ее изотопный состав. Это заметно обогатило не только планетологию, но и космологию. Ведь гигантские планеты не отпускают от себя вещество, они навечно сохраняют то, из чего родились; особенно это касается Юпитера. У его облачной поверхности вторая космическая скорость составляет 60 км/с: ясно, что ни одной молекуле оттуда никогда не уйти. Поэтому мы думаем, что изотопный состав Юпитера, особенно состав водорода, характерен для самых первых этапов жизни Солнечной системы, а может быть, и Вселенной. И это очень важно: соотношение тяжелого и легкого изотопов водорода показывает, как в первые ми-

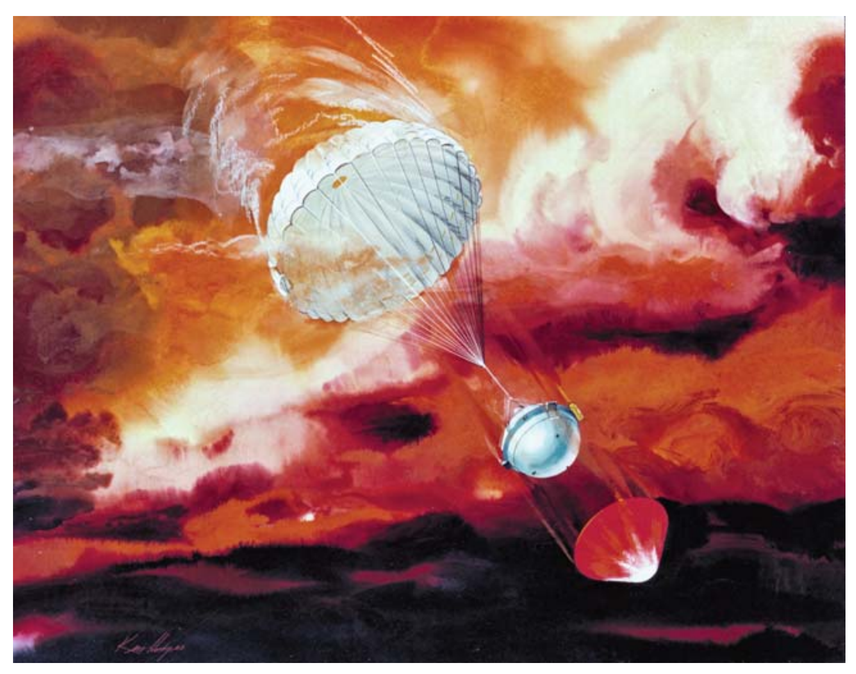


**Рис. 6.2.** Спускаемый аппарат с зонда «Галилео» в атмосфере Юпитера. Рисунок: Ken Hodges (NASA)

нуты эволюции нашей Вселенной протекал синтез химических элементов, какие физические условия тогда были.

Юпитер быстро вращается — с периодом около 10 часов, а поскольку средняя плотность планеты невелика (1,3 г/см$^3$), центробежная сила заметно деформировала ее тело. Невооруженным глазом видно, что планета сжата вдоль полярной оси. Степень сжатия Юпитера, т. е. относительная разница между его экваториальным и полярным радиусами, составляет $(R_{экв}-R_{пол})/R_{экв} = 0{,}065$. Именно средняя плотность планеты ($\rho \propto M/R^3$) и суточный период вращения ($T$) определяют форму ее тела. Как известно, планета — это космическое тело в состоянии гидростатического равновесия. На полюсе действует только сила тяготения ($GM/R^2$), а на экваторе ей противодействует центробежная сила ($V^2/R = 4\pi^2R^2/RT^2$). Их отношением и определяется форма планеты, поскольку давление в центре планеты не должно зависеть от направления: экваториальная колонка вещества весит столько же, сколько полярная. Отношение этих сил:

$$\frac{4\pi^2R/T^2}{GM/R^2} \propto \frac{1}{T^2M/R^3} \propto \frac{1}{\rho T^2}.$$

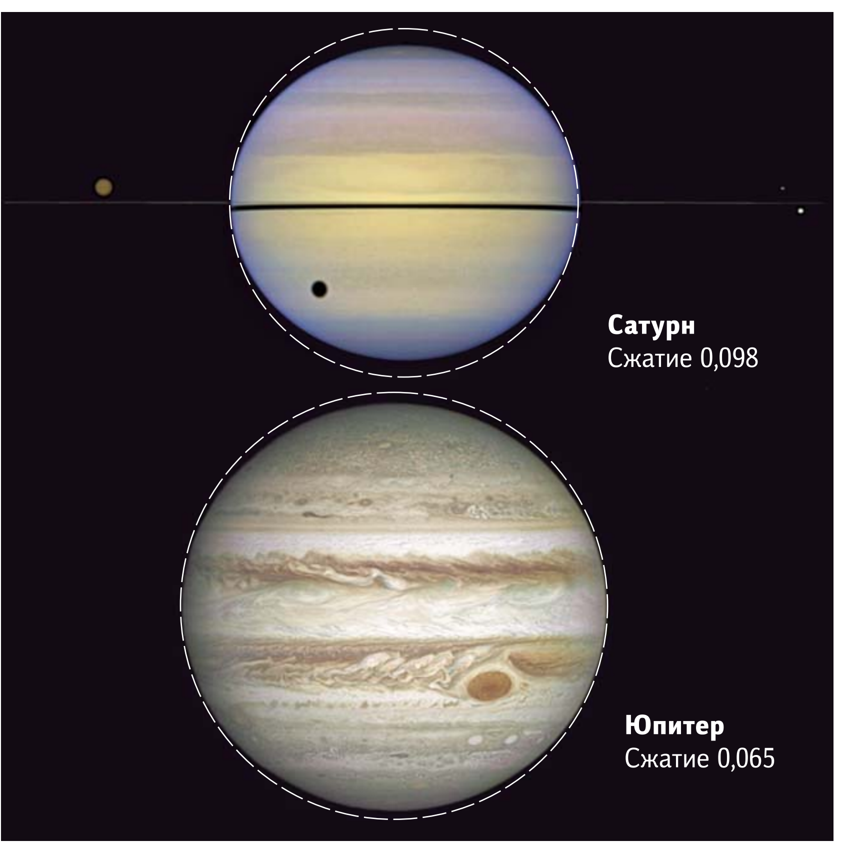



**Рис. 6.3. Форма дисков Сатурна и Юпитера в сравнении с правильными окружностями.**

Итак, чем меньше плотность и продолжительность суток, тем сильнее сжата планета. Проверим: средняя плотность Сатурна составляет 0,7 г/см$^3$, период его вращения — 11 час, почти такой же, как у Юпитера, а сжатие — 0,098. Сатурн сжат в полтора раза сильнее Юпитера, и это легко заметить при наблюдении планет в телескоп: сжатие Сатурна бросается в глаза.

Быстрое вращение планет-гигантов определяет не только форму их тела, а значит, и форму их наблюдаемого диска, но и его внешний вид: облачная поверхность планет-гигантов имеет зональную структуру с полосами разного цвета, вытянутыми вдоль экватора. Потоки газа движутся быстро, со скоростями во многие сотни километров в час; их взаимное смещение вызывает сдвиговую неустойчивость и совместно с силой Кориолиса порождает гигантские вихри. Изда-



**Рис. 6.4.** **Вихри в атмосфере Юпитера. Фото зонда «Juno» (NASA). Контраст искусственно усилен.**

лека заметны Большое Красное Пятно на Юпитере, Большой Белый Овал на Сатурне, Большое Темное Пятно на Нептуне. Особенно знаменит антициклон Большое Красное Пятно (БКП) на Юпитере. Когда-то БКП было вдвое больше нынешнего, его видели еще современники Галилея в свои слабенькие телескопы. Сегодня БКП побледнело, но все-таки этот вихрь уже почти 400 лет живет в атмосфере Юпитера, поскольку содержит гигантскую массу газа. Его размер больше земного шара. Такая масса газа, единожды закрутившись, не скоро остановится. На нашей планете циклоны живут примерно неделю, а там — столетия.

В любом движении рассеивается энергия, а значит, требуется ее источник. Каждая планета обладает двумя группами источников энергии — внутренними и внешними. Извне на планету льется поток солнечного излучения и падают метеороиды, изнутри ее греют распад радиоактивных элементов и гравитационное сжатие самой планеты (механизм Кельвина—Гельмгольца). Среди внешних источников энергии Солнце вне конкуренции. Хотя мы уже видели, как на Юпитер падают крупные объекты, вызывающие мощные взрывы (комета Шумейкеров—Леви 9), оценки частоты их падения показывают, что средний поток приносимой ими энергии существенно меньше, чем приносит солнечный свет. С другой стороны, роль внутренних источников энергии неоднозначна. У планет земной группы, состоя-

щих из тяжелых тугоплавких элементов, единственным внутренним источником тепла служит радиоактивный распад, но вклад его ничтожен по сравнению с теплом от Солнца.

У планет-гигантов доля тяжелых элементов существенно ниже, зато они массивнее и легче сжимаются, что делает выделение гравитационной энергии их главным источником тепла. А поскольку гиганты удалены от Солнца, внутренний источник становится конкурентом внешнему: порой сама планета греет себя сильнее, чем ее нагревает Солнце. Даже Юпитер, ближайший к Солнцу гигант, излучает (в инфракрасной области спектра) на 60% больше энергии, чем получает от Солнца. А энергия, которую излучает в космос Сатурн, в 2,5 раза больше той, которую планета получает от Солнца.

Гравитационная энергия выделяется как при сжатии планеты в целом, так и при дифференциации ее недр, т. е. при опускании к центру более плотного вещества и вытеснении оттуда более «плавучего». Вероятно, работают оба эффекта. Например, Юпитер в нашу эпоху уменьшается приблизительно на 2 см в год. А сразу после формирования он имел вдвое больший размер, сжимался быстрее и был значительно теплее. В своих окрестностях тогда он играл роль маленького солнца, на что указывают свойства его галилеевых спутников: чем ближе спутник к планете, тем он плотнее и тем меньше содержит летучих элементов. В целом такую же зависимость демонстрируют и сами планеты Солнечной системы по мере удаления от Солнца.

Кроме сжатия планеты как целого, важную роль в гравитационном источнике энергии играет дифференциация недр. Вещество разделяется на плотное и плавучее, в результате чего плотное вещество тонет, выделяя свою потенциальную гравитационную энергию в виде тепла. Вероятно, у планет-гигантов тепло выделяется в первую очередь в результате конденсации и последующего падения капель гелия сквозь всплывающие слои водорода, а также при фазовых переходах самого водорода. Но могут быть явления и поинтереснее: например, кристаллизация углерода — дождь из алмазов (!), правда, выделяющий не очень много энергии, поскольку углерода мало.

### Что там внутри?

Внутреннее строение планет-гигантов пока изучается только теоретически. На прямое проникновение в их недра у нас мало шансов, а методы сейсмологии, т. е. акустического зондирования, к ним пока не применялись. Возможно, когда-нибудь мы научимся просве-

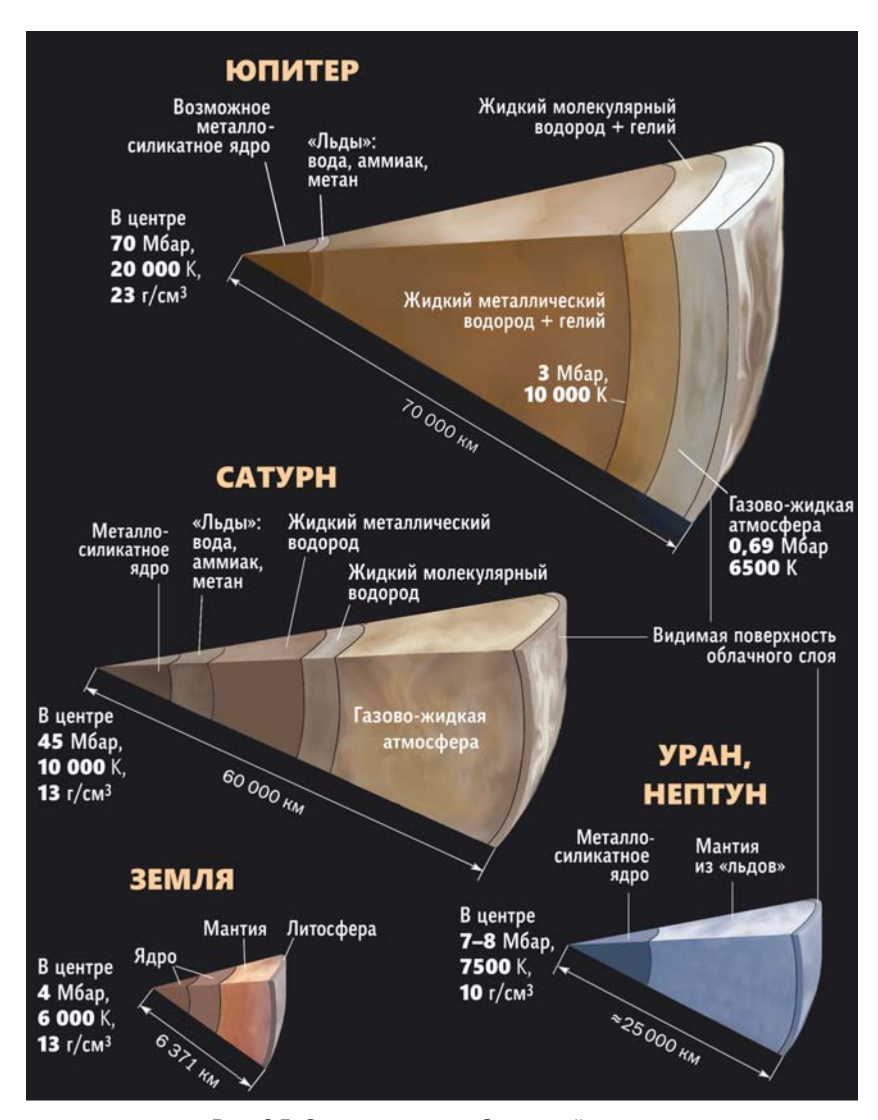



**Рис. 6.5.** Структура планет Солнечной системы.

чивать их с помощью нейтрино, но до этого еще далеко. К счастью, в лабораторных условиях уже неплохо изучено поведение вещества при тех давлениях и температурах, которые царят в недрах планет-гигантов, что дает материал для математического моделирования их недр. На рис. 6.5 показано наше нынешнее представление о внутреннем строении планет-гигантов и, для сравнения, Земли. У Зем-

ли, как видите, температура в центре достигает 6000 К (разные модели дают от 5700 до 6300 К). Получается, что в центре Земли такая же температура, как на поверхности Солнца. Но в недрах гигантов она еще выше: температура в ядре Юпитера — от 20 до 35 тыс. К (по разным моделям), т. е. такая же, как на поверхности самых горячих звезд спектрального класса О.

Для контроля адекватности моделей внутреннего строения планет есть методы. Два физических поля — магнитное и гравитационное, источники которых находятся в недрах, выходят в окружающее планету пространство, где их можно измерять приборами космических зондов.

На структуру магнитного поля действует много искажающих факторов (околопланетная плазма, солнечный ветер), зато гравитационное поле зависит только от распределения плотности внутри планеты. Чем сильнее тело планеты отличается от сферически симметричного, тем сложнее ее гравитационное поле, тем больше в нем гармоник, отличающих его от простого ньютонова $GM/R^2$.

Прибором для измерения гравитационного поля далеких планет, как правило, служит сам космический зонд, точнее, его движение в поле планеты. Чем дальше зонд от планеты, тем слабее в его движении проявляются мелкие отличия поля планеты от сферически симметричного, поэтому необходимо запускать аппарат как можно ближе к планете (см. гл. 3, рис. 3.9 и 3.10). С этой целью с 2016 г. рядом с Юпитером работает новый зонд Juno (NASA). Он летает по полярной орбите, чего раньше не было. На полярной орбите высшие гармоники гравитационного поля проявляются заметнее, поскольку планета сжата, а зонд время от времени подходит очень близко к поверхности. Именно это дает возможность измерить высшие гармоники разложения гравитационного поля. Но по этой же причине зонд довольно скоро закончит свою работу: он пролетает через наиболее плотные области радиационных поясов Юпитера, и его аппаратура от этого сильно страдает.

Радиационные пояса Юпитера колоссальны. При большом давлении водород в недрах планеты металлизируется: его электроны обобщаются, теряют связь с ядрами, и жидкий водород становится проводником электричества. Огромная масса сверхпроводящей среды, быстрое вращение и мощная конвекция — эти три фактора способствуют генерации магнитного поля за счет динамо-эффекта. В колоссальном магнитном поле, захватывающем летящие от Солн-




**Рис. 6.6.** Дозы радиации в системе спутников Юпитера (бэр/сутки).

ца заряженные частицы, формируются чудовищные радиационные пояса. В их наиболее плотной части лежат орбиты внутренних галилеевых спутников. Поэтому на поверхности Европы человек не прожил бы и дня, а на Ио — и часа. Даже космическому роботу нелегко там находиться. Более удаленные от Юпитера Ганимед и Каллисто в этом смысле значительно безопаснее для исследования, поэтому именно туда Роскосмос собирается в будущем послать зонд. Правда, Европа с ее подледным океаном была бы намного интереснее.

Ледяные гиганты Уран и Нептун выглядят промежуточными между газовыми гигантами и планетами земного типа. По сравнению с Юпитером и Сатурном у них меньше размер, масса и центральное давление, но при этом их относительно высокая средняя плотность указывает на большую долю элементов группы CNO. Протяженная и массивная атмосфера Урана и Нептуна в основном водородно-гелиевая. Под ней — водная с примесью аммиака и метана мантия, которую принято называть ледяной. Но планетологи подразумевают под «льдами» сами химические элементы группы CNO и их соединения ($H_2O$, $NH_3$, $CH_4$ и т. п.), а не агрегатное состояние, так что мантия в большей степени может быть жидкой. А под ней лежит сравнительно небольшое железно-каменное ядро. Поскольку концентрация углерода в недрах Урана и Нептуна выше, чем у Сатурна и Юпитера, в основа-

нии их ледяной мантии может лежать слой жидкого углерода, в котором конденсируются кристаллы, т. е. алмазы, оседающие вниз.

Подчеркну, что внутреннее строение планет-гигантов активно обсуждается, и конкурирующих моделей пока довольно много. Каждое новое измерение с борта космического зонда и каждый новый результат лабораторного моделирования в установках высокого давления приводят к пересмотру этих моделей. Напомню, что прямое измерение параметров весьма неглубоких слоев атмосферы, да и то только у Юпитера, было выполнено лишь однажды зондом, сброшенным с «Галилео» (NASA). А всё остальное — косвенные измерения и теоретические модели.

Магнитные поля Урана и Нептуна слабее, чем у газовых гигантов, но сильнее, чем у Земли. Хотя у поверхности Урана и Нептуна индукция поля примерно такая же, как у поверхности Земли (доли гаусса), но объем, а значит, и магнитный момент намного больше. Геометрия магнитного поля ледяных гигантов очень сложна и далека от простой дипольной формы, характерной для Земли, Юпитера и Сатурна. Вероятная причина — в том, что магнитное поле Урана и Нептуна генерируется в относительно тонком электропроводящем слое мантии, где конвекционные потоки не обладают высокой степенью симметрии (поскольку толщина слоя много меньше его радиуса).

При внешнем сходстве Уран и Нептун нельзя назвать близнецами: у них разная средняя плотность (соответственно 1,27 и 1,64 г/см$^3$) и разная интенсивность выделения тепла в недрах. Хотя Уран в полтора раза ближе к Солнцу, чем Нептун, и поэтому получает от него в 2,5 раза больше тепла, он холоднее Нептуна. Дело в том, что Нептун выделяет в своих недрах даже больше тепла, чем получает от Солнца, а Уран не выделяет почти ничего. Поток тепла из недр Урана вблизи его поверхности составляет всего $0{,}042 \pm 0{,}047$ Вт/м$^2$ — меньше, чем у Земли (0,075 Вт/м$^2$). Уран — самая холодная планета в Солнечной системе, хотя и не самая далекая от Солнца. Связано ли это с его странным вращением «на боку»? Не исключено.

Теперь поговорим о кольцах планет.

### Кольца планет-гигантов

Все знают, что «окольцованная планета» — это Сатурн. Но при внимательном наблюдении выясняется, что кольца есть у всех планет-гигантов. С Земли их заметить сложно. Например, кольцо Юпитера мы не видим в телескоп, но замечаем его в контровом освеще-

**Рис. 6.7.** Юпитер. Фото зонда «Галилео» (NASA)



нии, когда космический зонд смотрит на планету с ее ночной стороны (рис. 6.7). Это кольцо состоит из темных и очень мелких частиц, размер которых сравним с длинной волны света. Они практически не отражают свет, но хорошо рассеивают его вперед.

Тонкими кольцами окружены Уран и Нептун (рис. 6.8 и 6.9). Вытянутые изображения звезд указывают, что экспозиция была длительной, поэтому диск планеты получился с передержкой и его пришлось закрыть. Только так удалось заснять кольца. Но все же они за-

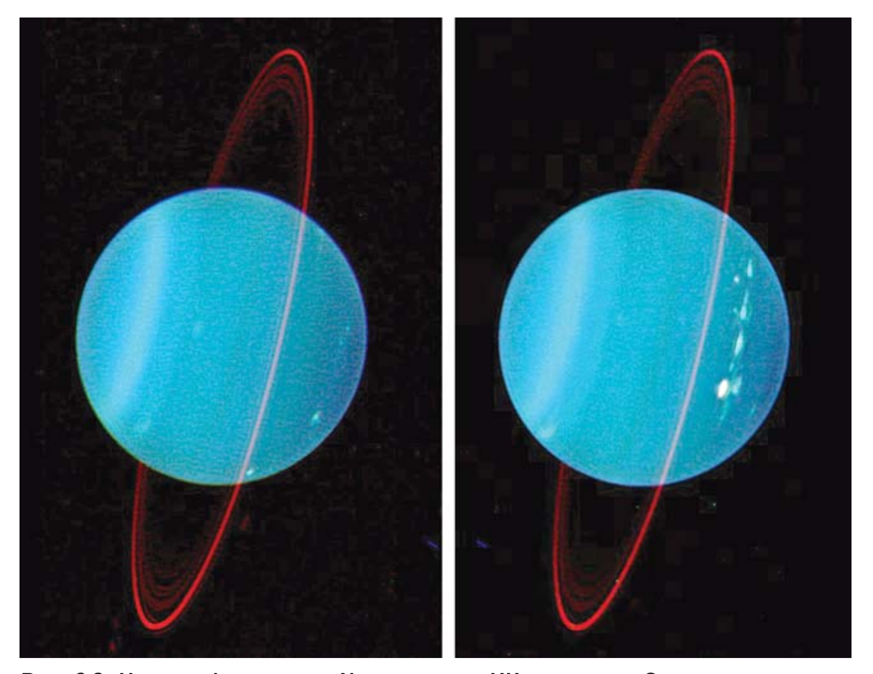


**Рис. 6.8.** На этом фото кольца Урана сняты в ИК-диапазоне. Снимки получены на 10-метровом телескопе «Кек» с использованием системы адаптивной оптики.

метны в прямом свете, а не в контровом, т. е. их частицы неплохо отражают свет.

**Характеристики колец планет Солнечной системы**

| Параметр | Юпитер | Сатурн | Уран | Нептун |
|---|---|---|---|---|
| Размер в радиусах планеты | 1,8 | 2,4 | 2,2 | 2,5 |
| Альбедо | 0,02 | 0,6 | 0,03 | 0,03 |
| Размер частиц | $10^{-3}$ см | от сантиметров до метров | | |
| Толщина | 30–300 км | 10–100 м | 10–100 м | 10–100 м |
| Диаметр астероида эквивалентной массы, км | 0,2 | 200 | 4 | 1 |

Как видим, кольца совершенно разные. Размер их частиц — от метров до микрометров; поверхность частиц — от светлой ($A = 0,6$) до очень темной ($A = 0,02$); толщина колец — от десятков метров до сотен километров, а масса вещества в них различается в миллиард раз! Единственное, что объединяет кольца, — их радиусы относительно радиуса своей планеты ($R$). Внешний радиус кольца в $(2 \div 2,5)R$ определяется влиянием приливных сил. Это размер так называемой зоны Роша — расстояние от центра планеты, на котором мягкое тело ее же плотности разрушается под действием приливных сил.

Заметить какую-либо взаимосвязь между параметрами колец довольно сложно. Материал колец Сатурна белый как снег (альбедо 60%), а остальные кольца чернее угля ($A = 2–3\%$). Все кольца тонкие, а у Юпитера довольно толстое. Все из «булыжников», а у Юпитера —

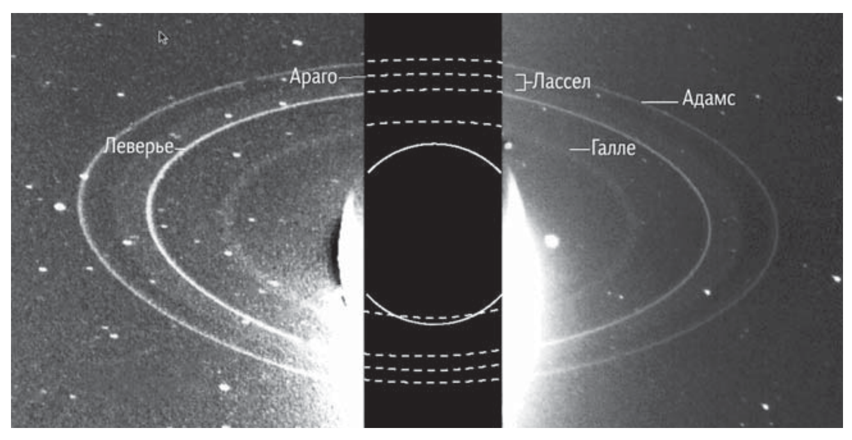



**Рис. 6.9. Кольца Нептуна. Фото зонда «Вояджер-2» (NASA), сделанное при пролете вблизи Нептуна в 1989 г.**

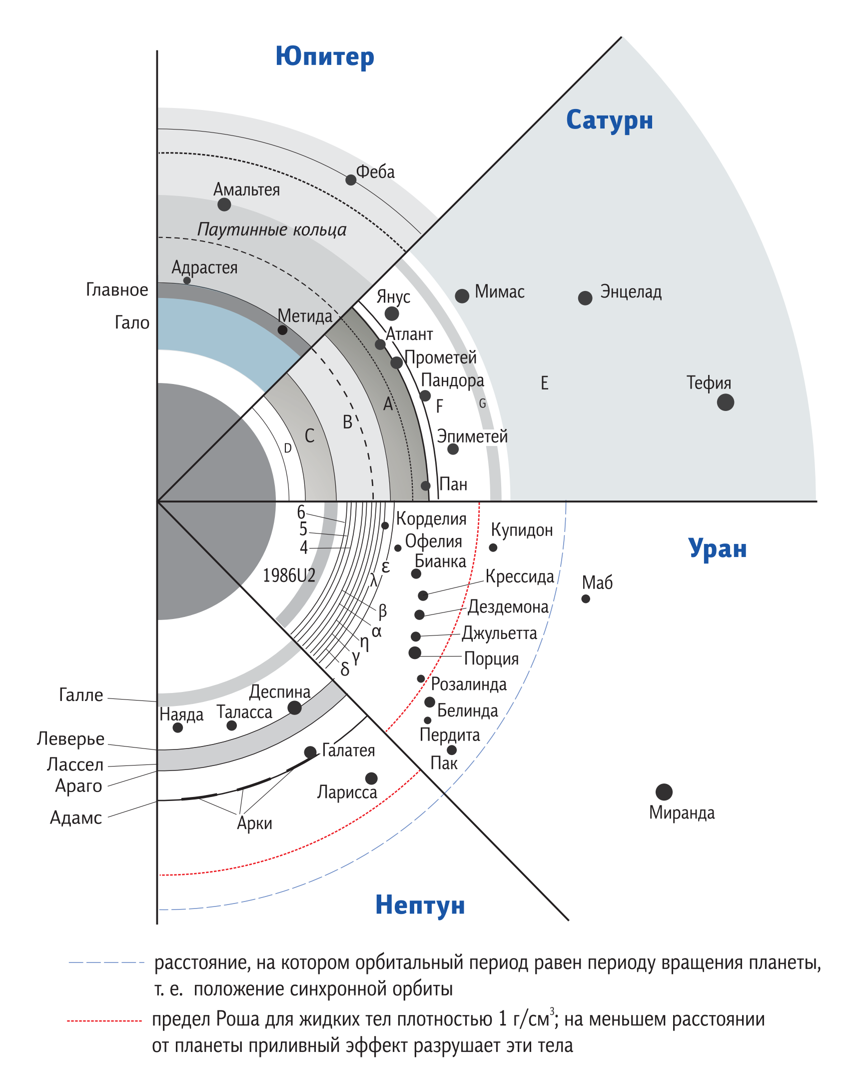



**Рис. 6.10. Кольца и внутренние спутники планет-гигантов. Все расстояния масштабированы к экваториальному радиусу соответствующей планеты.**

из пылинок. Структура колец тоже разная: одни напоминают граммофонную пластинку (Сатурн), другие — матрешкообразную кучу обручей (Уран), третьи — размытые, диффузные (Юпитер), а кольца Нептуна вообще не замкнуты и похожи на арки.

В голове не укладывается относительно малая толщина колец: при диаметре в сотни тысяч километров их толщина измеряется десятками метров. Мы никогда не держали в руках столь тонкие пред-

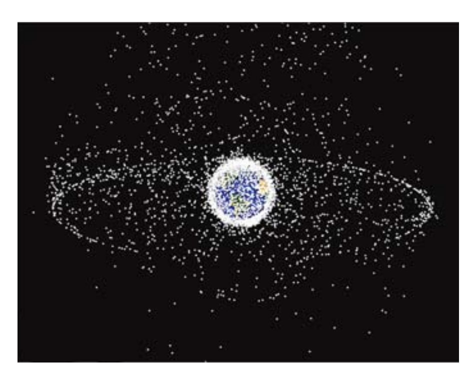


**Рис. 6.11.** **Спутники на геостационарных орбитах образуют «кольцо» вокруг Земли.**

меты. Если сравнить кольцо Сатурна с листом писчей бумаги, то при его известной толщине размер листа был бы с футбольное поле!

В шутку можно сказать, что и у Земли есть кольцо — искусственное. Оно состоит из нескольких сотен спутников, выведенных на геостационарную орбиту (рис. 6.11). Здесь показаны не только геостационарные спутники, но и те, что находятся на низких орбитах, а также на высоких эллиптических орбитах, но геостационарное кольцо выделяется на их фоне вполне заметно. Впрочем, это рисунок, а не фото. Сфотографировать искусственное кольцо Земли пока никому не удалось, ведь его полная масса невелика, а светоотражающая поверхность ничтожна. Едва ли суммарная масса спутников в кольце составит 1000 тонн, что эквивалентно астероиду размером 10 м. Сравните это с параметрами колец планет-гигантов.

Плоскость кольца совпадает с экватором планеты. Иного и быть не может, поскольку у симметричной сплющенной планеты вдоль

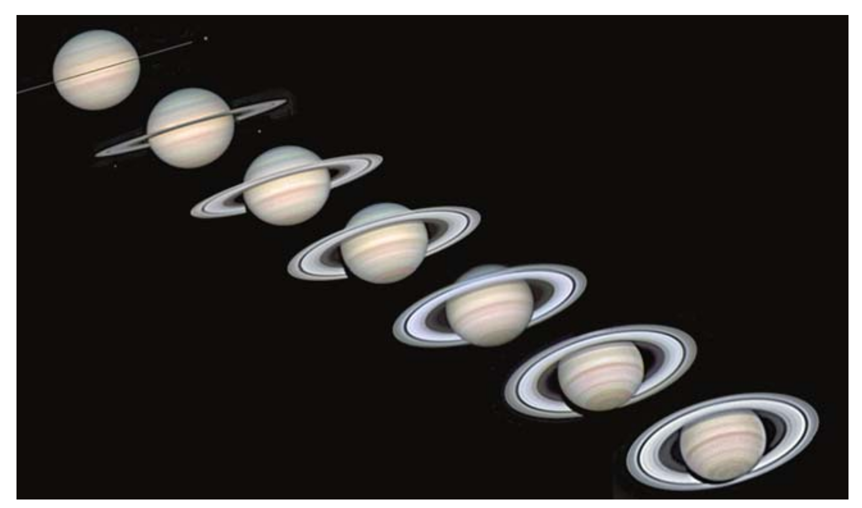


**Рис. 6.12.** **Последовательные снимки Сатурна, сделанные в 2004–2009 гг. (снизу вверх).Фото: Alan Friedman.**

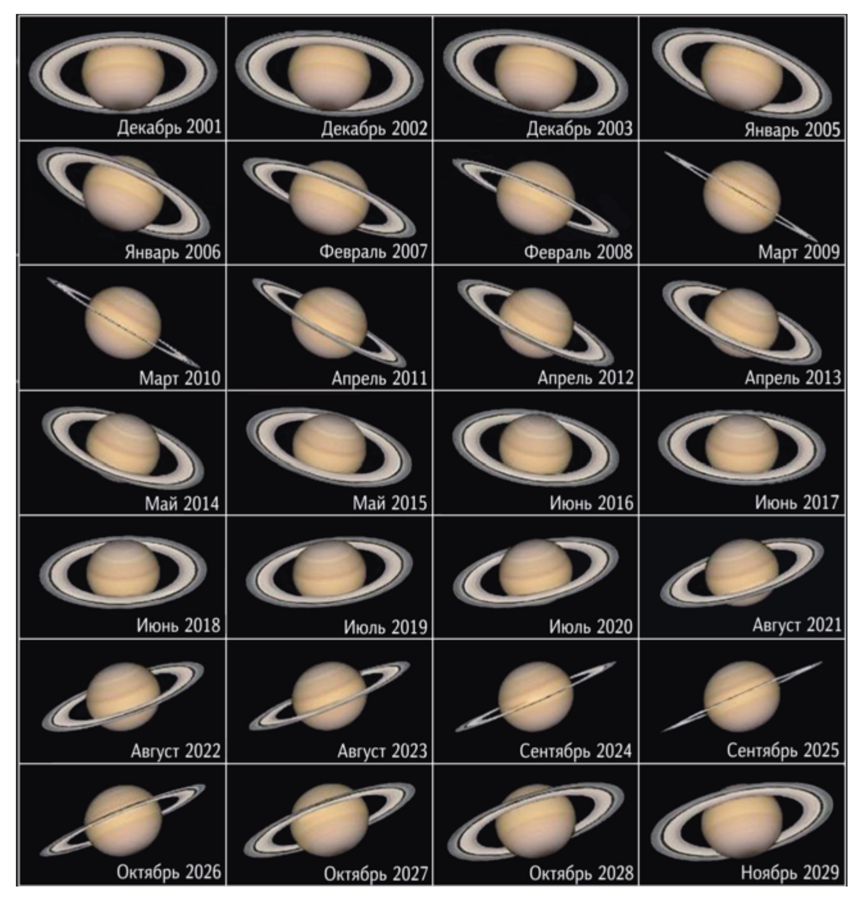



**Рис. 6.13.** **Результат расчета того, как меняется внешний вид Сатурна для земного наблюдателя за период в 28 лет. Весьма благоприятными для наблюдения кольца будут 2018–2020 гг. Так что, если вы хотите полюбоваться кольцом Сатурна, поторопитесь — даже в слабый телескоп вы сможете увидеть это замечательное творение природы.**

экватора в гравитационном поле — потенциальная яма. На серии снимков, полученных с 2004 по 2009 гг. (рис. 6.13), мы видим Сатурн и его кольцо в разных ракурсах, поскольку экватор Сатурна наклонен к плоскости его орбиты на 27°, а Земля всегда недалеко от этой плоскости. В 2009 г. мы точно оказались в плоскости колец. Сами понимаете: при толщине несколько десятков метров самого́ кольца мы не видим. Тем не менее черная полоска на диске планеты заметна — это тень кольца на облаках. Она видна нам, поскольку Земля и Солнце смотрят на Сатурн с разных направлений: мы находимся точно в плоскости кольца, но Солнце освещает Сатурн немного под другим

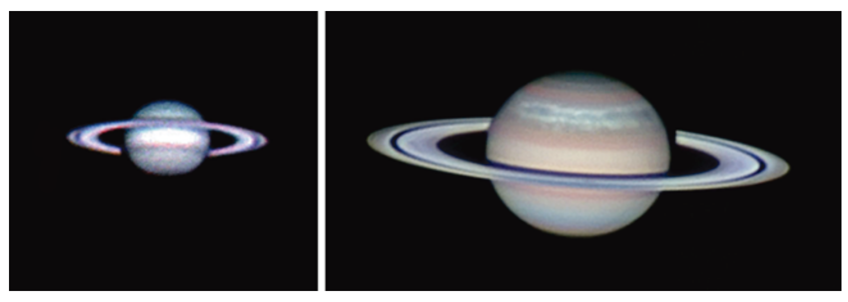


**Рис. 6.14.** ***Слева:*** **снимок Сатурна с однократной экспозицией в любительский телескоп. Примерно так же он виден при наблюдении в телескоп глазом.** ***Справа:*** **лучшее из 4800 изображений, полученных с профессиональным телескопом (B. Combs). Но и на нем у кольца еще не видно почти никакой структуры. Давно была замечена темная «щель» — разрыв Кассини, который более 300 лет назад открыл итальянский астроном Джованни Кассини. Кажется, что в разрыве ничего нет.**

углом, и тень кольца ложится на облачный слой планеты. Раз есть тень, значит, в кольце — довольно плотно «упакованное» вещество. Тень кольца исчезает только в дни равноденствия на Сатурне, когда Солнце оказывается точно в его плоскости, и это еще одно указание на малую толщину кольца.

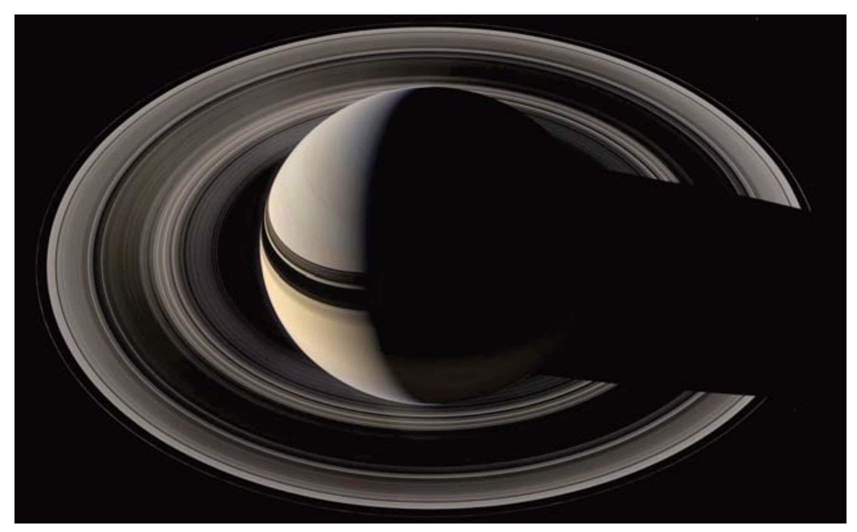


**Рис. 6.15. На этом снимке особенно хорошо видна тень кольца на облачной поверхности Сатурна и, разумеется, тень самой планеты на кольце. В данном случае мы видим ночную сторону кольца, недоступную для наблюдения с Земли. Взгляд на любой предмет с другой стороны всегда полезен. Там, где в прямом свете мы видели черноту, «провал» в кольце, здесь мы видим вещество; просто оно другого типа, по-другому отражает и рассеивает свет.**

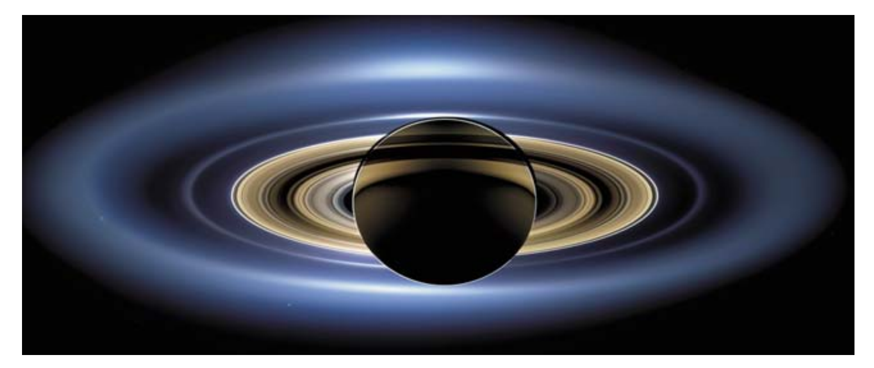


**Рис. 6.16.** С ночной стороны Сатурна сразу появляются те слабо видимые части колец, которые в прямом свете не видно. Фото зонда «Кассини» (NASA).

Кольцу Сатурна посвящено много работ. Джеймс Клерк Максвелл, тот самый, что прославился своими уравнениями электромагнитного поля, исследовал физику кольца и показал, что оно не может быть единым твердым предметом, а должно состоять из мелких частиц, иначе центробежная сила разорвала бы его. Каждая частица летит по своей орбите — чем ближе к планете, тем быстрее.

Когда космические зонды прислали снимки кольца Сатурна, нас поразила его тонкая структура. Однако еще в XIX в выдающиеся наблюдатели на обсерватории Пик-дю-Миди во Франции именно эту структуру видели глазом, но им тогда никто особенно не поверил, потому что никто, кроме них, подобных тонкостей не замечал. Но оказалось, что кольцо Сатурна именно такое. Объяснение этой тонкой радиальной структуре кольца специалисты по звездной динамике ищут в рамках резонансного взаимодействия частиц кольца с массивными спутниками Сатурна вне кольца и мелкими спутниками внутри кольца. В целом теория волн плотности справляется с задачей, но до объяснения всех деталей еще далеко.

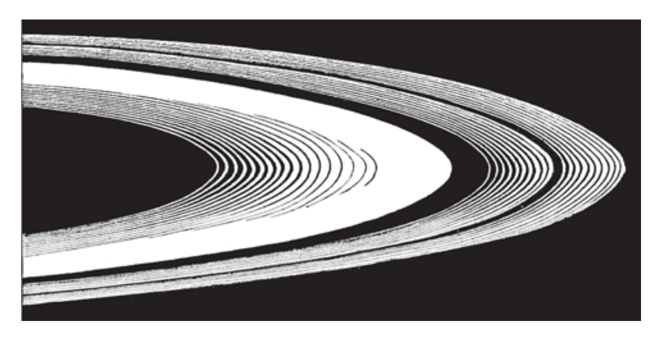


**Рис. 6.17.** Рисунок, выполненный на обсерватории Пик-дю-Миди (Франция) в XIX в.

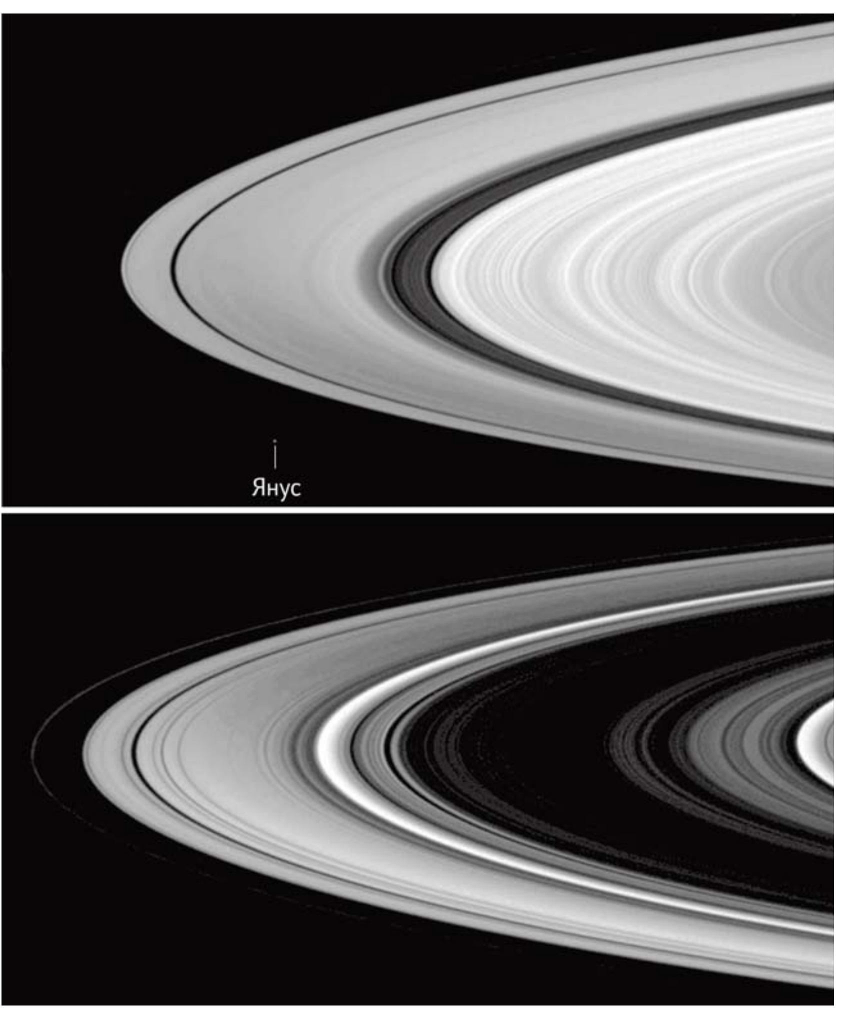



**Рис. 6.18.** Вверху — дневная сторона колец Сатурна. Зонд пролетает через их плоскость, и на нижнем снимке они повернуты к нам ночной стороной: вещество в делении Кассини стало вполне заметно, а яркие кольца, плотные и непрозрачные, напротив, потемнели. Это связано с тем, что мелкие частицы не отражают свет, а рассеивают его вперед. Снимки показывают, что вещество есть везде, но его частицы — разного размера и структуры. Что заставляет эти частицы разделяться, пока не очень ясно. На верхнем фото виден Янус — один из спутников Сатурна.

Надо сказать, что, хотя космические аппараты пролетали близко от колец Сатурна, ни одному из них не удалось увидеть реальные частицы, составляющие кольца, мы видим лишь общее их распределение. Отдельные глыбы не видны — исследователи не риску-

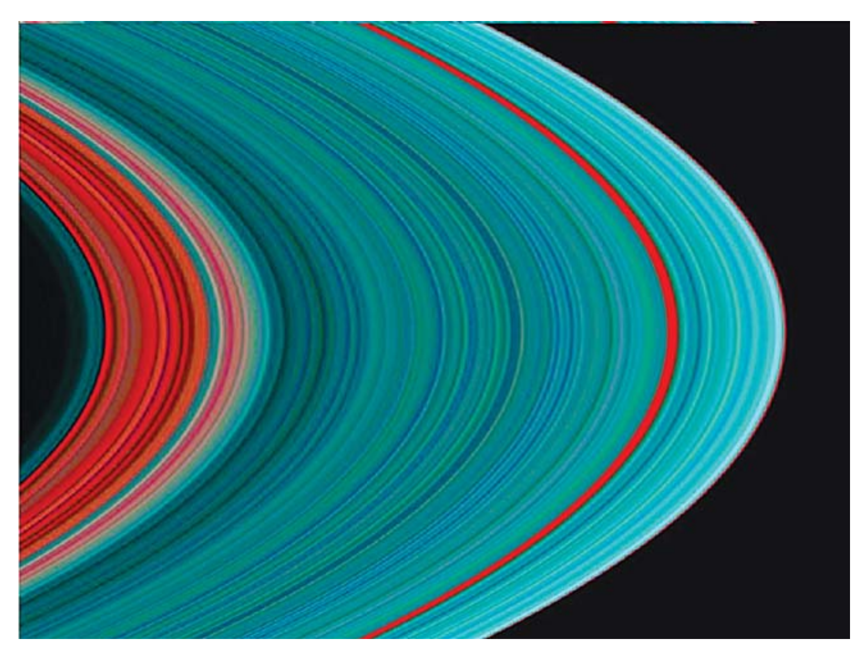


**Рис. 6.19.** Это не настоящий цветной снимок: цветами здесь показан характерный размер частиц, составляющих ту или иную область. Красные — мелкие частицы, бирюзовые — более крупные. Фото зонда «Кассини» (NASA)

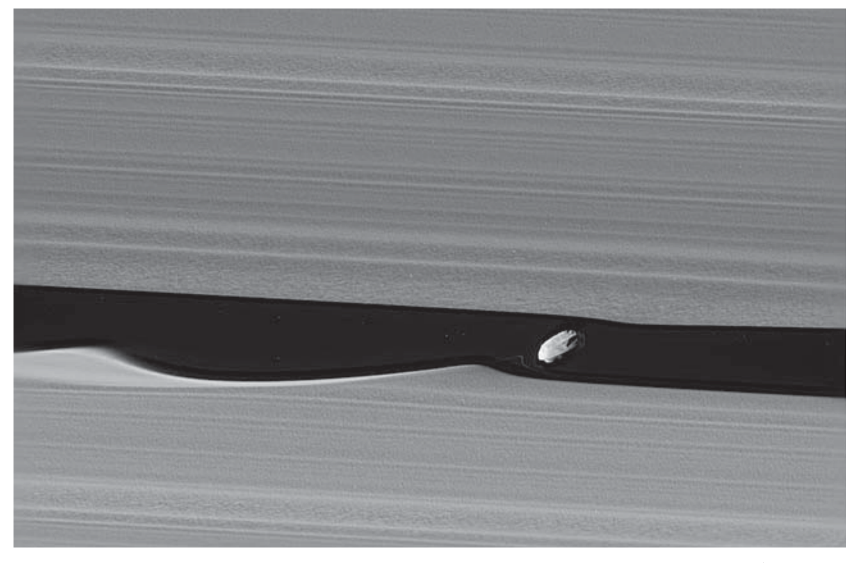


**Рис. 6.20.** Гравитационные возмущения колец Сатурна, создаваемые небольшим спутником Дафнисом. Фото зонда «Кассини» (NASA).




**Рис. 6.21.** Кольца и некоторые спутники Сатурна (навания спутников даны курсивом).

ют запускать аппараты внутрь колец. Но когда-нибудь это придется сделать.

Когда кольцо разворачивается ребром к Солнцу, тени от крупных неоднородностей ложатся на плоскость кольца (рис. 6.22, 6.23). Самая длинная тень здесь — от спутника Мимас, а многочисленные мелкие пики, которые в увеличенном изображении показаны на врезке, однозначного объяснения пока не получили. За них ответственны вы-

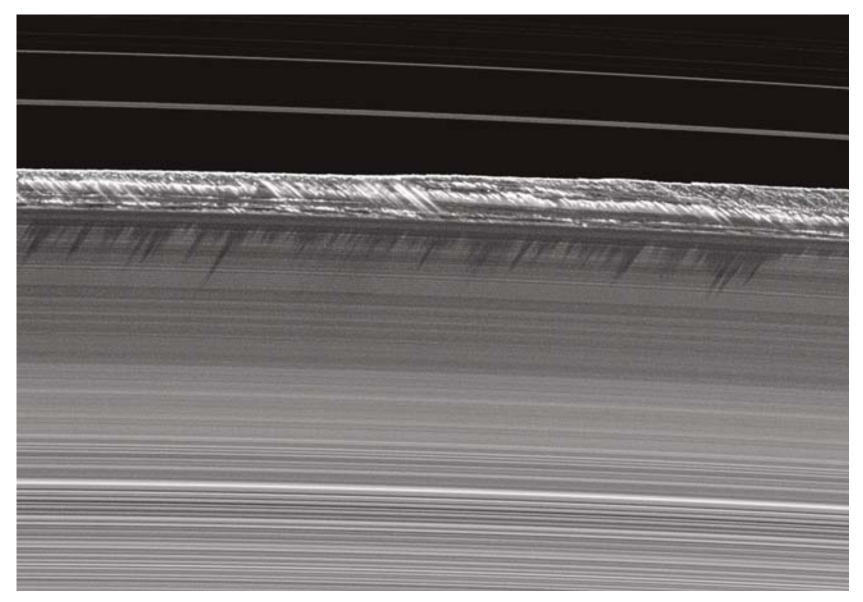


**Рис. 6.22.** Пики и тени от них в кольце B Сатурна. Фото зонда «Кассини» (NASA).

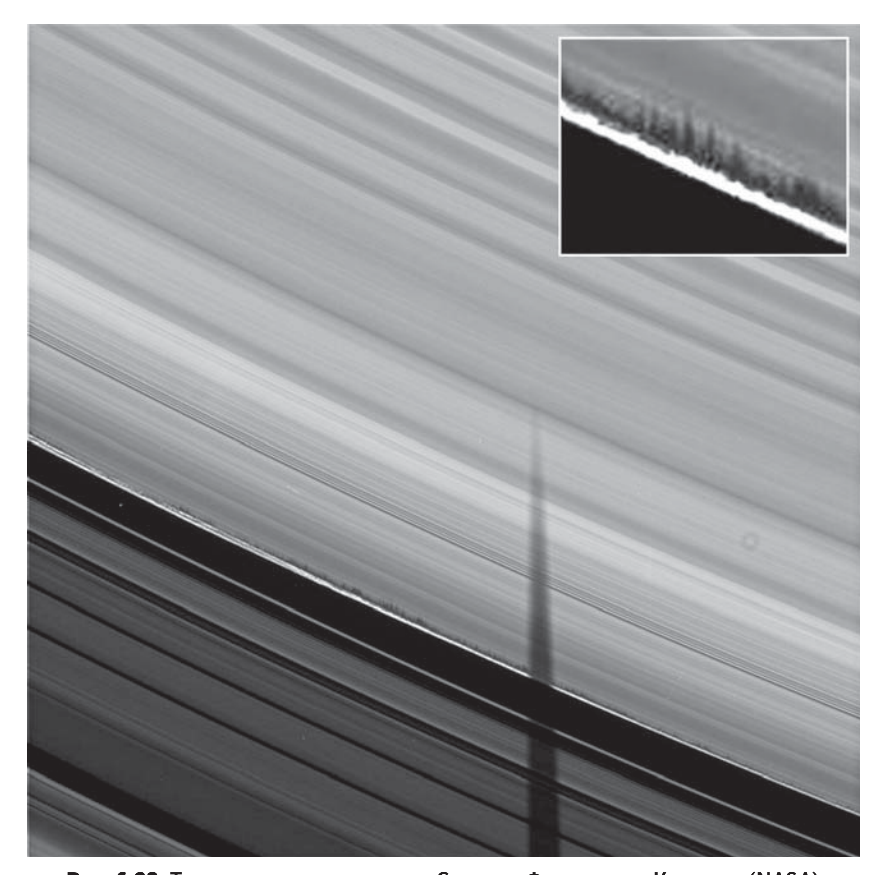


**Рис. 6.23.** Тени на поверхности колец Сатурна. Фото зонда «Кассини» (NASA).

ступы километрового размера. Не исключено, что некоторые из них — это тени от наиболее крупных камней. Но квазирегулярная структура теней более соответствует временным скоплениям частиц, возникающим в результате гравитационной неустойчивости.

Вдоль некоторых колец летают спутники, так называемые «сторожевые псы» или «пастушьи собаки», которые своей гравитацией удерживают от размытия некоторые кольца. Причем сами спутники довольно интересны: один из двух движется внутри тонкого кольца, другой снаружи (например, Янус и Эпиметей). Их орбитальные периоды чуть-чуть различны: внутренний ближе к планете и, следовательно, быстрее облетает ее, догоняет наружный спутник и за счет взаимного притяжения меняет свою энергию: наружный притормаживается, внутренний ускоряется, и они меняются орбитами — тот,

что затормозил, переходит на низкую орбиту, а тот, что ускорился, — на высокую. Так они делают несколько тысяч оборотов, а затем вновь меняются местами. Упомянутые выше Янус и Эпиметей меняются местами раз в 4 года.

Несколько лет назад открыли самое далекое кольцо Сатурна, о котором вообще не подозревали. Это кольцо связано со спутником Феба, с поверхности которого улетает пыль, заполняя область вдоль орбиты спутника. Плоскость вращения этого кольца, как и самого спутника, не связана с экватором планеты, поскольку из-за большого расстояния гравитация Сатурна воспринимается как поле точечного объекта.

### Спутники

У каждой гигантской планеты есть семейство спутников. Особенно богаты ими Юпитер и Сатурн. На сегодняшний день у Юпитера их известно 79, а у Сатурна — 62, и регулярно обнаруживаются новые. Нижняя граница массы и размера для спутников формально не установлена, поэтому для Сатурна это число условное: если вблизи планеты обнаруживается объект размером 20–30 метров, то что это — спутник планеты или частица ее кольца?

В любом многочисленном семействе космических тел мелких всегда больше, чем крупных. Спутники планет — не исключение. Мелкие спутники — это, как правило, глыбы неправильной формы, в основном состоящие изо льда. Имея размер менее 500 км, они не в состоянии своей гравитацией придать себе сфероидальную форму. Внешне они очень похожи на астероиды и ядра комет. Вероятно,

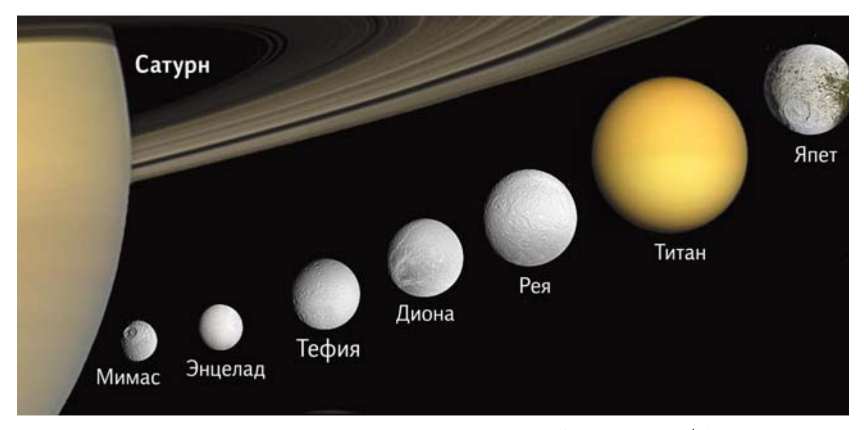



**Рис. 6.24.** Крупнейшие спутники Сатурна (не в масштабе).

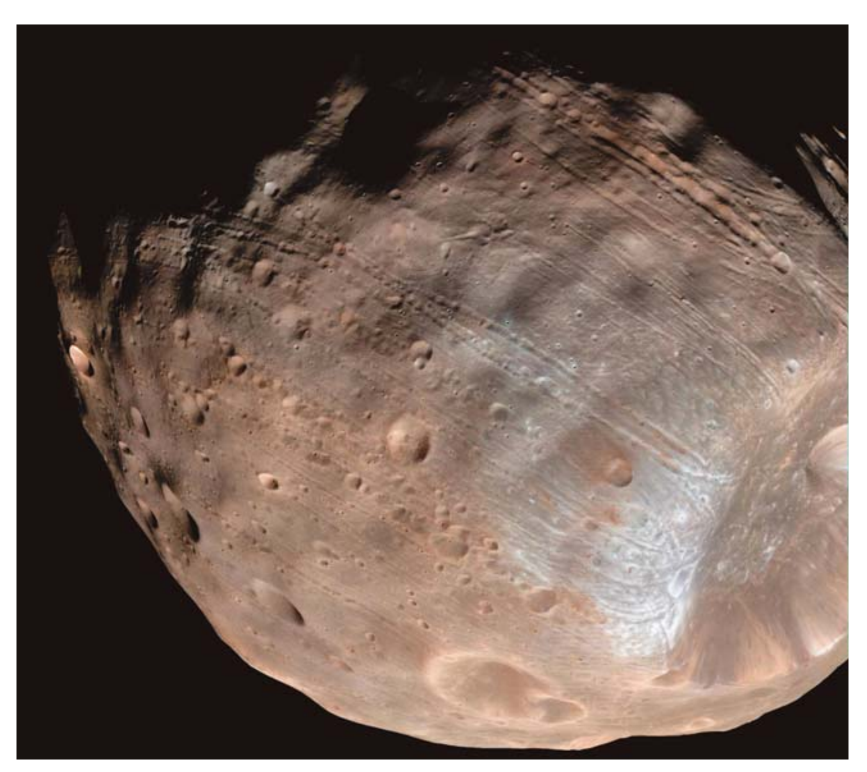


**Рис. 6.25.** Фобос. Фото зонда Mars Reconaissance Orbiter (NASA)

многие из них таковыми и являются, поскольку движутся вдали от планеты по весьма хаотическим орбитам. Планета могла захватить их, а через некоторое время может потерять.

С малыми астероидоподобными спутниками мы пока знакомы не очень близко. Детальнее других исследованы такие объекты у Марса — два его небольших спутника, Фобос и Деймос. Особенно пристальное внимание было привлечено к Фобосу; на его поверхность даже хотели отправить зонд, но пока не получилось. Чем внимательнее присматриваешься к любому космическому телу, тем больше в нем загадок. Фобос — не исключение. Посмотрите, какие странные структуры идут вдоль его поверхности. Эти линии из мелких провалов и борозд похожи на меридианы. Существует уже несколько физических теорий, пытающихся объяснить их образование, но пока никто не предложил исчерпывающей.

Все мелкие спутники несут на себе многочисленные следы ударов. Время от времени они сталкиваются друг с другом и с прихо-




**Рис. 6.26.** Наиболее крупные спутники планет Солнечной системы в одном масштабе с Землей и Меркурием. Они ничем не уступают Меркурию, а по своей природе порой даже более интересны.

дящими издалека телами, дробятся на отдельные части, а могут и объединяться, поэтому восстановить их далекое прошлое и происхождение будет нелегко. Но среди спутников есть и те, что генетически связаны с планетой, поскольку движутся рядом с ней в плоскости ее экватора и, скорее всего, имеют общее с ней происхождение.

Особый интерес представляют крупные планетоподобные спутники. У Юпитера их четыре; это так называемые «галилеевы» спутники — Ио, Европа, Ганимед и Каллисто. У Сатурна выделяется своим размером и массой могучий Титан. Эти спутники по своим внутренним параметрам почти неотличимы от планет. Просто их движение вокруг Солнца контролируется еще более массивными телами — материнскими планетами.

Вот перед нами Земля и Луна, а рядом в масштабе спутник Сатурна Титан. Замечательная маленькая планета с плотной атмосферой, с жидкими большими «морями» из метана, этана и пропана на поверхности. Моря из сжиженного газа, который при температуре поверхности Титана (–180 °C) находится в жидком виде. Очень привлекательная планета, потому что на ней будет легко и интересно работать — атмосфера плотная, надежно защищает от космических лучей и по составу близка к земной атмосфере, поскольку тоже в основном состоит из азота, хотя и лишена кислорода. Вакуумные скафандры там не нужны, поскольку атмосферное давление почти как на Земле, даже чуть больше. Тепло оделись, баллончик с кислородом за спину — и вы легко будете работать на Титане. Кстати, это единственный (кроме Луны) спутник, на поверхность которого удалось посадить космический аппарат. Это был «Гюйгенс», доставленный туда на борту «Кассини» (NASA, ESA), и посадка была довольно удачной.

Вот единственный снимок, сделанный на поверхности Титана (рис. 6.28). Температура низкая, поэтому глыбы — это очень холод-

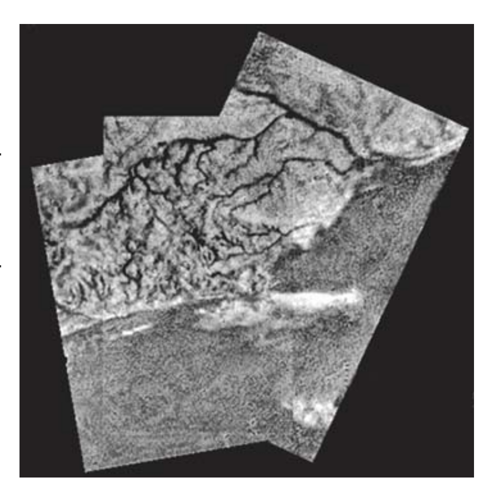


**Рис. 6.27. Снимок поверхности Титана, сделанный зондом «Гюйгенс» с высоты нескольких километров при спуске на парашюте 14 января 2005 г. Видны русло реки и дно озера, в которое впрадает река, в настоящий момент сухие, но еще недавно в них была жидкость — вероятно, метан.**

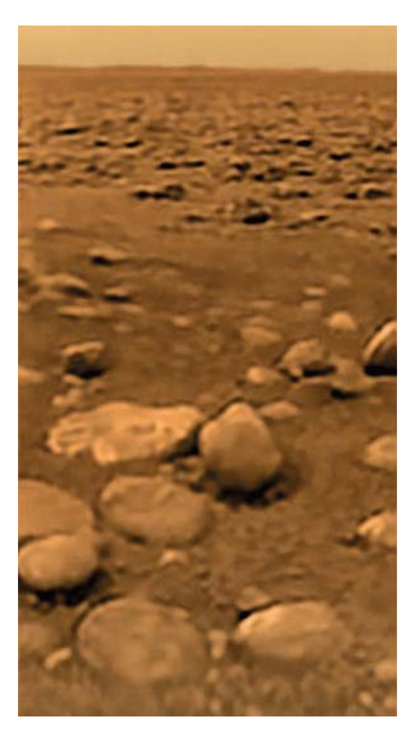


**Рис. 6.28.** Поверхность Титана. Снимок зонда «Гюйгенс».

ный водяной лед. Мы в этом уверены, потому что Титан вообще по большей части состоит из водяного льда. Цвет красновато-рыжеватый; он естественный и связан с тем, что в атмосфере Титана под действием солнечного ультрафиолета синтезируются довольно сложные органические вещества под общим названием «толины». Дымка из этих веществ пропускает к поверхности в основном оранжевый и красный цвет, довольно сильно его рассеивая. Поэтому изучать из космоса географию Титана довольно сложно. Помогает радиолокация. В этом смысле ситуация напоминает Венеру. Кстати, и циркуляция атмосферы на Титане тоже венерианского типа: по одному мощному циклону в каждом из полушарий.

Спутники других планет-гигантов тоже оригинальны. Ио, ближайший спутник Юпитера, находится на таком же расстоянии от планеты, что и Луна от Земли, но Юпитер — гигант, а значит, действует на свой спутник очень сильно. Приливное влияние Юпитера расплавило недра спутника, и мы видим на нем множество действующих вулканов, которые выглядят как черные точки. Видно, что выбросы вокруг вулканов ложатся по баллистическим траекториям. Ведь там практически нет атмосферы, поэтому то, что выброшено из вулкана, летит по параболе (или по эллипсу?). Малая сила тяжести на поверхности Ио создает условия для высоких выбросов: 250–300 км вверх, а то и прямо в космос!

Второй от Юпитера спутник, Европа, покрыт ледяной корой, как наша Антарктида. Под корой, толщина которой оценивается в 25–30 км, — океан жидкой воды. Ледяная поверхность покрыта многочисленными древними трещинами. Под влиянием подледного океана пласты льда медленно перемещаются, напоминая этим дрейф

земных материков. Трещины во льду время от времени открываются, и оттуда фонтанами вырывается вода. Теперь мы это знаем точно, поскольку видели фонтаны с помощью космического телескопа «Хаббл». Это открывает перспективу исследовать воду Европы. Кое-что о ней мы уже знаем: это соленая вода, хороший проводник электричества, на что указывает магнитное поле. Ее температура, вероятно, близка к комнатной, но о ее биологическом составе мы пока ничего не знаем. Хотелось бы зачерпнуть и проанализировать эту воду. И экспедиции с этой целью уже готовятся.

Другие крупные спутники планет, включая нашу Луну, не менее интересны. По сути, они представляют самостоятельную группу планет-спутников.



# 7 Планеты-карлики, астероиды и кометы

## Планеты, которые не мешают жить другим

Кроме больших планет с их кольцами и спутниками, в Солнечной системе есть семейство планет-карликов (*dwarf planets*), учрежденное решением Международного астрономического союза в 2006 г. Пока их всего пять: Плутон, Эрида, Макемаке, Хаумея и бывший крупнейший астероид Церера — его тоже ввели в эту группу, поскольку по своим физическим свойствам он отвечает определению карликовой планеты, т. е. имеет настолько большую массу, чтобы под действием собственной гравитации приобрести сфероидальную форму. При этом масса Цереры не настолько велика, чтобы она была способна своим притяжением расчистить окрестности своей орбиты от соседних тел. В этом и заключается второе важнейшее свойство любой карликовой планеты.

За исключением Цереры, все планеты-карлики движутся вне области орбит больших планет, в основном — в поясе Койпера (от 30 до 50 а. е.). Правда, Плутон из-за большого эксцентриситета своей орбиты иногда заходит в пределы орбиты Нептуна: с 1979 по 1999 гг. Плутон был ближе к Солнцу, чем Нептун. Эрида тоже часть времени проводит за пределами пояса Койпера, удаляясь за его формальную внешнюю границу на 98 а. е. от Солнца. Пока из пяти известных карликовых планет мы близко знакомы лишь с двумя — с Плутоном и Церерой, рядом с которыми побывали межпланетные роботы.

Космический зонд «Рассвет» (Dawn, NASA) вышел на орбиту вокруг Цереры в марте 2015 г. В истории космонавтики это стало первым посещением окрестностей планеты-карлика. В 2018 г. зонд еще функционирует; когда его ресурсы истощатся, он останется вечным спутником Цереры.

Церера была первым открытым астероидом (1801 г.), и в течение двух столетий ее изучали в телескопы, но только космический телескоп «Хаббл» смог разглядеть крупнейшие детали ее поверхности и

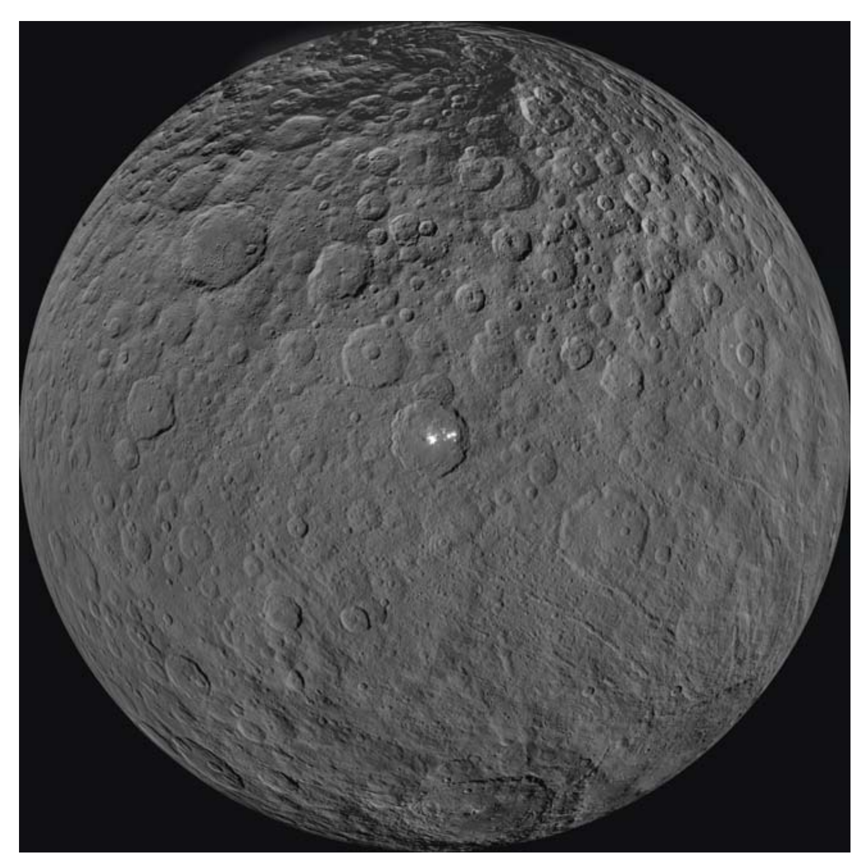


**Рис. 7.1.** Фото Цереры, сделанное зондом «Рассвет» с высоты 385 км. В центре — кратер Оккатор (Occator), имеющий координаты 20° с. ш., 239° в. д. Разрешение 140 м/pix.

заметить на ней странные яркие пятна. Теперь на детальных снимках зонда «Рассвет» мы видим, что это свежие выходы водяного льда или отложения солей, вынесенных из недр потоками воды. Судя по средней плотности Цереры (2,16 г/см$^3$), она имеет каменное ядро и толстую ледяную мантию. Поверхность сильно кратерированная и очень темная (альбедо 9%), как у Луны. Хотя верхний слой Цереры по традиции называют реголитом, он отличается от лунного реголита бóльшим содержанием воды. По-видимому, поверхность Цереры представляет собой глинистый материал с порами, заполненными водяным льдом (около 10%).

Поскольку наклон экватора Цереры к орбитальной плоскости составляет всего 4°, в ее полярных областях много кратеров, в кото-

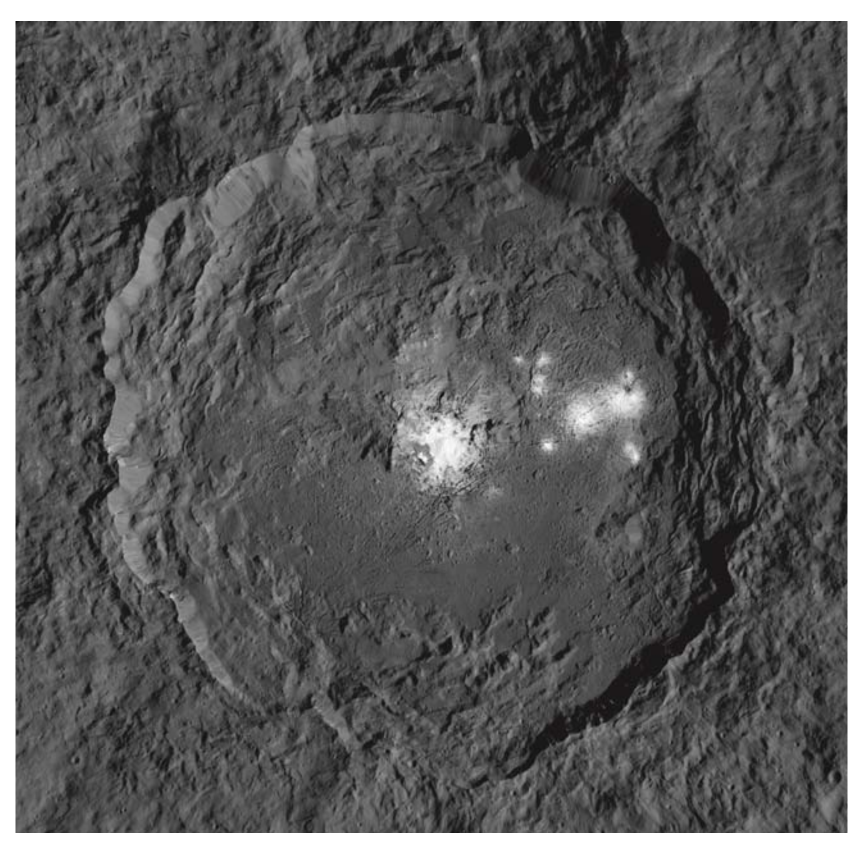


**Рис. 7.2.** **Кратер Оккатор диаметром 80 км. На его дне видны отложения льда или солей. Это самое яркое из светлых пятен, замеченных «Хабблом».**

рые никогда не попадают лучи Солнца. В этих «холодных ловушках» замечен лед. Еще больше льда в глубине Цереры. Например, на дне кратера Оккатор видны отложения льда или солей. Впрочем, почти наверняка это именно лед, поскольку Церера окутана крайне разреженной атмосферой из водяного пара, который, очевидно, образуется при сублимации льда.

Наличие водяного льда под поверхностью делает Цереру в геологическом смысле более живым телом, чем Луна, хотя Церера намного меньше Луны. Кстати, и метеоритных кратеров на поверхности Цереры не так много, как ожидалось, что говорит о действии процессов эрозии, возможно, связанных с активностью недр.

Один из самых интересных объектов на поверхности Цереры — ледяная гора Ахуна (Ahuna). Это криовулкан, результат истечения

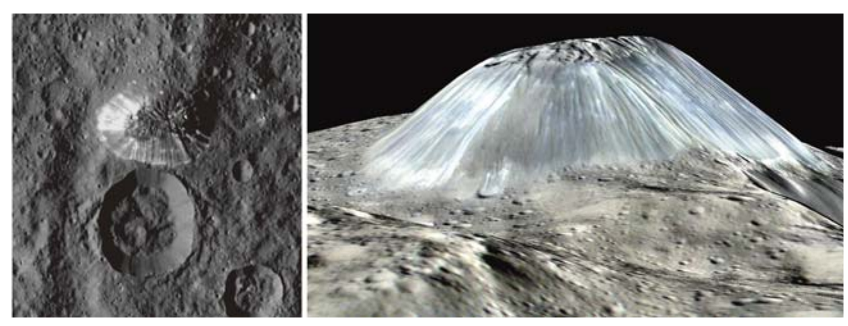


**Рис. 7.3. Ледяная гора Ахуна близ экватора Цереры. Высота этого криовулканического купола — немногим более 4 км, диаметр у основания — около 20 км. *Слева* — фото с орбиты, *справа* — компьютерная модель, созданная по снимкам в разных ракурсах.**

воды из недр и ее намерзания на склонах. Средняя температура поверхности Цереры у экватора — около −118 °C, а максимальная не превышает −40 °C. Но и при этой температуре лед обладает определенной вязкостью, так что долго такой объект существовать не может. И расчеты, и малое количество метеоритных кратеров на склонах говорят о том, что возраст Ахуны — не более нескольких сотен миллионов лет.

Не исключено, что криовулканизм на Церере в нашу эпоху стимулируется внешними ударами. Например, ледяная гора Ахуна лежит недалеко от антиподной точки крупнейшей ударной структуры на Церере — 280-километрового бассейна Керван (Kerwan). Часть энергии мощного удара переносится сейсмической волной и концентрируется в диаметрально противоположной области планеты, взламывая кору и растапливая ледяную массу под ней, особенно если та насыщена солями. Кстати, склоны Ахуны действительно насыщены натриевой солью угольной кислоты, т. е. карбонатом натрия ($Na_2CO_3$). Подобные структуры-антиподы встречаются и на других безатмосферных планетах, например на Меркурии и на Луне. Криовулканы — тоже не редкость. Но уникальность Ахуны в том, что это ближайший к Солнцу криовулкан.

Как видим, Церера оказалась очень интересным и сравнительно легко доступным телом. Ее масса составляет почти треть полной массы Главного пояса астероидов и при этом лишь около 1,3% от массы Луны (из чего следует, что весь пояс астероидов в 25 раз легче Луны!) Период суточного вращения Цереры — 9 часов. Ускорение силы тяжести на ее поверхности — всего 28 см/с$^2$, т. е. в 35 раз меньше земного. Вторая космическая скорость у поверхности — 0,5 км/с.




**Рис. 7.4.** Планеты-карлики с их спутниками и Земля для сравнения. Вид поверхности Эриды, Макемаке и Хаумеи придуман художником: мы пока знаем лишь их размер и форму.

Это открывает хорошую перспективу для посадки зонда на поверхность Цереры и доставки на Землю ее вещества.

Орбиты остальных четырех карликовых планет целиком или частично лежат в поясе Койпера. Все они заметно крупнее Цереры и все обладают спутниками, что дает возможность определять их массу. «Патриарх» этой группы — Плутон. Он самый большой по размеру и второй по массе (после Эриды) из известных карликовых планет. Как и другие объекты пояса Койпера, Плутон состоит изо льда и камня. По массе он в 6 раз, а по объему в 3 раза меньше Луны. У Плутона есть крупный спутник — Харон, открытый с Земли в 1978 г. Диаметром он лишь вдвое, а массой в 8 раз меньше самой планеты. Харон движется по круговой орбите с периодом 6,4 сут на расстоянии около 20 тыс. км от Плутона. Поскольку центр масс системы Плутон—Харон лежит в пространстве между ними, вне пределов их тел, эту пару нередко называют двойной карликовой планетой. Вокруг Плутона и Харона обращаются четыре маленьких спутника (Кербер, Никта, Гидра и Стикс) диаметрами от 6 до 50 км.

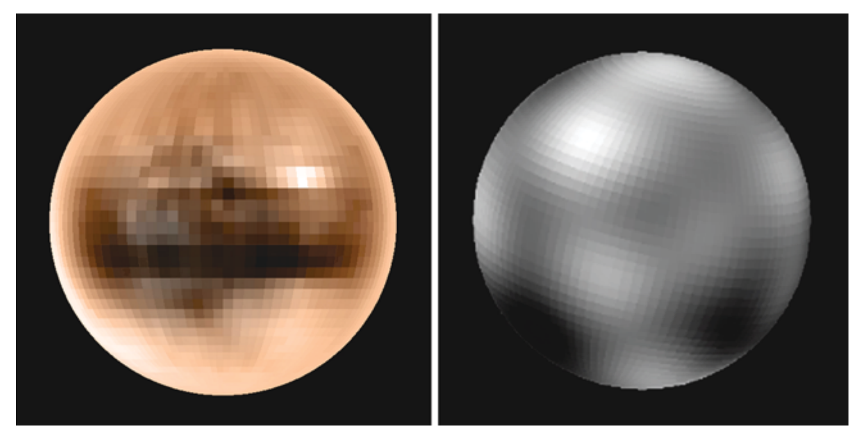


**Рис. 7.5.** **Наилучшие изображения Плутона, полученные издалека (от Земли).** ***Слева:*** **изображение восстановлено математическим методом по результатам наземных изменений яркости Плутона в период прохождения перед ним Харона (1985–1990).** ***Справа:*** **изображение восстановлено по вариациям яркости, вызванным суточным вращением Плутона и наблюдавшимся космическим телескопом «Хаббл».**

По стечению обстоятельств первый космический зонд добрался до Плутона лишь на несколько месяцев позже, чем до Цереры, — в июле 2015 г. Это был «New Horizons» (NASA), пролетевший вблизи Плутона и его спутников и передавший детальные снимки их поверхностей. Осуществление этого проекта заняло более 26 лет: 14 лет потребовалось, чтобы проработать проект и добиться его финансирования, еще 4 года — чтобы построить и запустить космический аппарат, и затем более 9 лет, чтобы он пролетел через Солнечную систему к самой далекой планете (в день запуска, 19 января 2006 г., Плутон еще формально входил в категорию больших планет). После встречи с Плутоном передача на Землю всех собранных о нем и его свите данных продолжалась около полутора лет. Их детальное изучение началось только в конце 2016 г.

До этого момента о Плутоне было известно очень мало. Даже космический телескоп «Хаббл» лишь с трудом различал его диск с несколькими крупными деталями альбедо на нем. Правда, именно «Хаббл», и только он, смог в 2011–2012 гг. обнаружить 4 малых спутника Плутона. Но в результате экспедиции «New Horizons» мы узнали о Плутоне, Хароне и их спутниках гораздо больше интересного и неожиданного, чем смогли дать все наблюдения издалека.

Детальные снимки Плутона поразили нас тем, что эта маленькая планета оказалась в геологическом смысле живым телом. Хотя



**Рис. 7.6.** Плутон. Контраст цвета усилен. Фото: «New Horizons» (NASA).

бóльшая часть поверхности Плутона, судя по множеству метеоритных кратеров на ней, весьма древняя, все же значительная доля поверхности залита свежим льдом, т. е. геологически молода.

В целом поверхность Плутона покрыта летучими льдами — замерзшими азотом, метаном, монооксидом углерода и этаном. При температуре и давлении, царящих на Плутоне, азот, метан и монооксид углерода являются летучими и могут перемещаться путем сублимации и конденсации. Самое летучее вещество из них — азот, поэтому крайне разреженная атмосфера Плутона более чем на 99% состоит именно из него. На поверхности азот и метан не образуют чистых льдов, а составляют твердый раствор друг в друге, причем где-то в нем преобладает азот, а где-то метан. Монооксид углерода также растворен в летучих льдах.

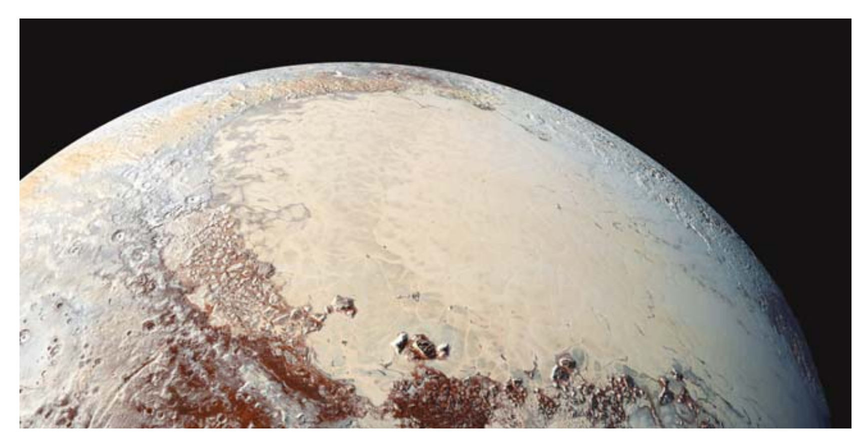


**Рис. 7.7.** Равнина Спутника. Контраст цвета усилен. Фото: «New Horizons» (NASA).

На полушарии Плутона, детально сфотографированном зондом «New Horizons» в момент наибольшего сближения с планетой (рис. 7.7.), выделяется обширная светлая Область Томбо (Tombaugh Regio), названная в честь первооткрывателя планеты Клайда Томбо, и особенно ее левая часть — Равнина Спутника (Sputnik Planitia), названная в честь нашего первого спутника 1957 года. Но дело, разумеется, не в названии, а в том, что лед, покрывающий Равнину Спутника, практически полностью лишен метеоритных кратеров, следовательно, он недавно образовался в этой части планеты. Возраст этой поверхности — не более 10 млн лет.

Равнина Спутника — это депрессия размером 1400÷750 км и глубиной 3–4 км, заполненная льдами азота, метана и монооксида углерода. Ее поверхность плоская, гладкая и белая. С запада ее окаймляют горы из водяного льда (рис. 7.8). Их форма, состав и расположение оставляют впечатление, что это блоки ледяной коры Плутона, всплывшие в более плотном и пластичном азотном льду.

Равнина Спутника расположена в экваториальной области Плутона, которую регулярно — половину каждых плутонианских суток — освещает Солнце. В результате все летучие льды оттуда испарились, обнажив темно-красный слой толинов — смеси органических сополимеров, образующихся в атмосфере планеты из простых органический соединений, таких как метан и этан, под действием ультрафиолетового излучения Солнца. В этом довольно темном экваториальном поясе Плутона Равнина Спутника выделяется своей яркостью и белым цветом, что было замечено еще по наблюдениям с космиче-

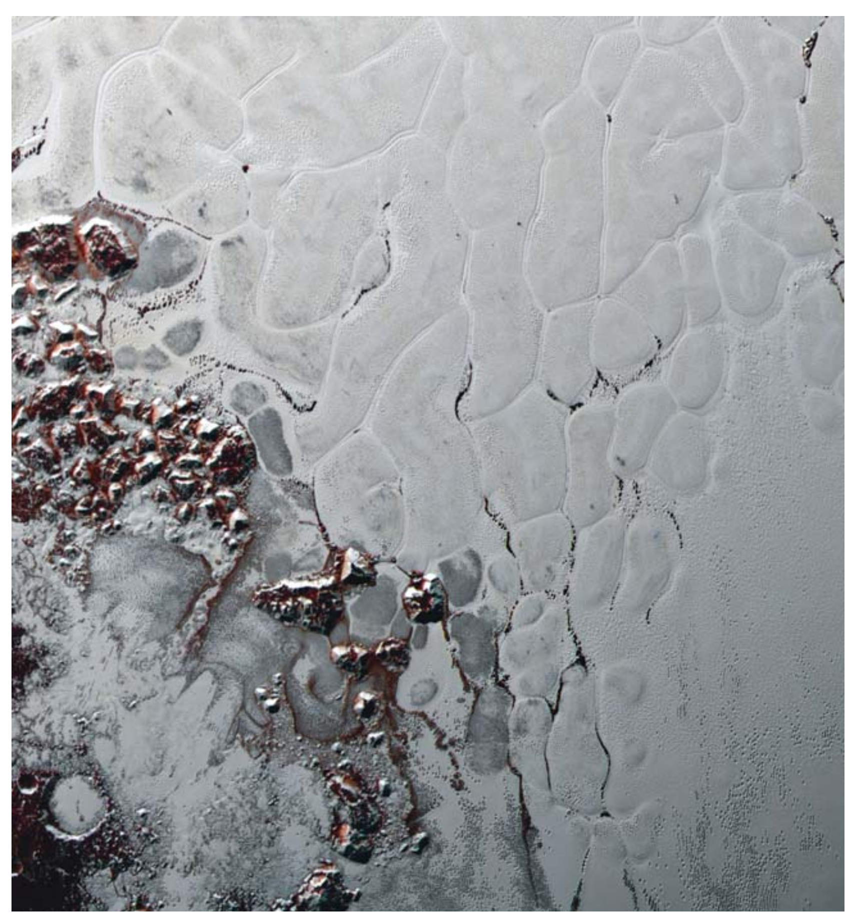


**Рис. 7.8. Поверхность Равнины Спутника с признаками криовулканической активности. Фото: «New Horizons» (NASA).**

ским телескопом «Хаббл». Поверхность равнины разбита на блоки скругленно-многоугольной формы, которые явно подвижны и напоминают глетчеры, т. е. ледники. Вероятно, это вершины конвективных ячеек. Источник энергии, поддерживающий конвекцию мягких льдов, пока не ясен. Это может быть распад радиоактивных элементов в недрах Плутона или остаточное тепло от падения крупного метеорита. Не исключено также, что падение метеорита произошло в диаметрально противоположной точке Плутона, где виден огромный кратер, а сейсмические волны сконцентрировались и выделили тепло в районе Равнины Спутника.

Яркая молодая поверхность Равнины Спутника обязана своей уникальностью двум эффектам. Во-первых, медленное конвективное движение льдов постоянно обновляет эту поверхность с характерным временем менее 1 млн лет. Во-вторых, высокое альбедо ледника снижает его температуру и создает на его поверхности холодную ловушку: атмосферные газы конденсируются преимущественно на Равнине Спутника, покрывая ее свежими льдами и поддерживая в стабильном состоянии на масштабах времени в десятки миллионов лет.

На западном краю полушария, над которым пролетел «New Horizons», лежит Земля Веги (Vega Terra), названная в честь советских космических зондов «Вега-1 и -2». Эта область отличается обилием ударных кратеров с темным дном и светлой каймой из метанового снега. Было неясно, почему метановый лед лежит только на кромках кратеров и почему этот эффект не проявляется на остальной поверхности Плутона. Выяснилось, однако, что температура атмосферы Плутона возрастает с высотой. На поверхности в низинах могут конденсироваться и азот, и метан, но, поскольку доля азота в атмосфере Плутона превышает 99%, образующийся иней состоит в основном из азота. В горах же на большой высоте и на кромках кратеров температура оказывается слишком высокой для конденсации азота, и там конденсируется один метан.

С 1989 г. Плутон, пройдя перигелий, удаляется от Солнца, и, казалось бы, его атмосфера должна постепенно замерзать на его поверхности, а атмосферное давление — падать. Но наблюдения покрытий Плутоном звезд и данные зонда «New Horizons» показывают, что с 1988 до 2015 г. атмосферное давление выросло примерно втрое. Вероятно, это связано с тем, что в 1987 г. северный полюс Плутона впервые за 124 года вышел из тени, что способствовало испарению азота из его полярной шапки. А южный полюс, нагревавшийся до этого солнечными лучами, еще не успел остыть настолько, чтобы в его окрестности мог конденсироваться азот. Вполне возможно, что атмосфера Плутона остается газообразной даже в районе афелия, когда планета максимально удаляется от Солнца.

Из-за малой силы тяжести плотность атмосферы на Плутоне медленно меняется с высотой. Особенно это заметно на больших высотах, где с высотой растет температура. Поэтому можно было бы ожидать, что в результате диссипации (т. е. вылета атомов из атмосферы в космос) Плутон быстро теряет атмосферный газ. Но, как по-

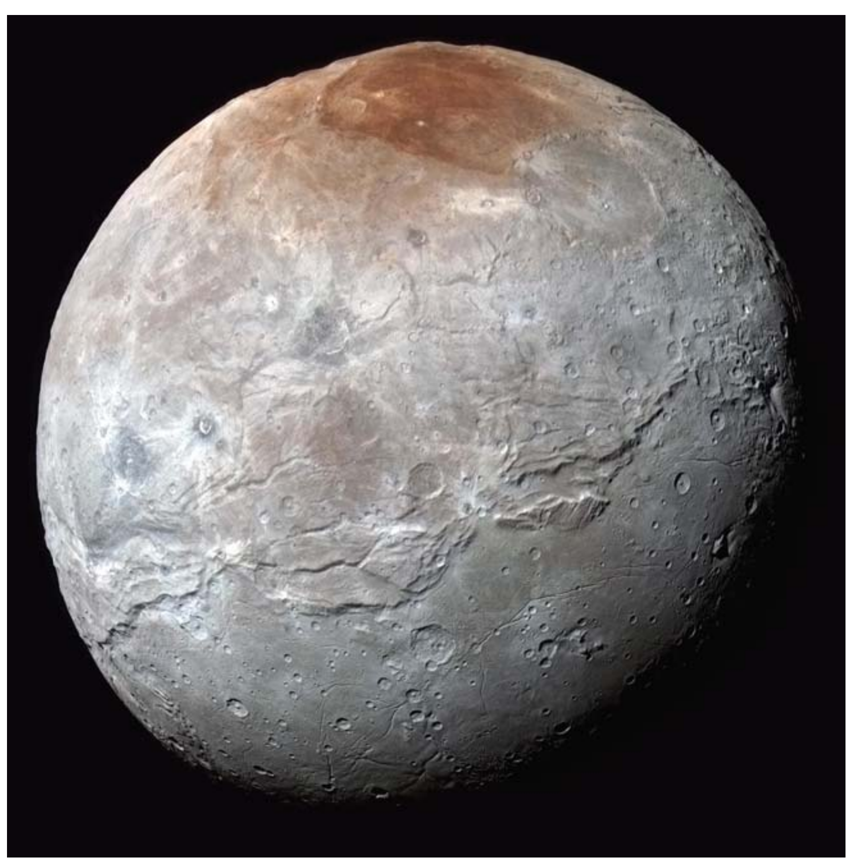


**Рис. 7.9. Харон. Контраст цвета усилен. Фото: «New Horizons» (NASA).**

казали наблюдения с борта «New Horizons», утечка азота из атмосферы в космос в 10 тыс. раз меньше, чем ожидалось. А расчеты говорят, что при сравнительно небольшом росте температуры поверхности давление атмосферы Плутона может возрасти настолько, что превзойдет давление марсианской атмосферы и позволит существовать на поверхности планеты жидкому азоту. Косвенным указанием на это служит деталь рельефа Плутона — долина между гор с очень ровной поверхностью, похожая на замерзшее озеро. Вероятно, это свидетельство той эпохи, когда Плутон имел более плотную атмосферу и на его поверхности могла существовать жидкость.

«Младший брат» Плутона — Харон — тоже оказался очень интересным небесным телом. Его средняя плотность немного меньше, чем у

Плутона, т. е. в составе Харона больше льдов и меньше каменистых пород. В отличие от поверхности Плутона, которая состоит из азотного и метанового льда, на поверхности Харона доминирует менее летучий водяной лед.

Альбедо поверхности Харона меняется в зависимости от широты — от светлого экватора к темным полюсам (у большинства планет — наоборот!). В северной полярной области Харона есть большая темная область, которую научная команда «New Horizons» неофициально назвала «Мордором». Разница в цвете объясняется, как полагают, конденсацией газов из атмосферы Плутона. Из-за большого наклона оси вращения Плутона и Харона к плоскости их околосолнечной орбиты (60° без учета направления вращения) в их околополярных областях происходят обширные и длительные полярные дни и ночи. Зимой, т. е. полярной ночью, температура опускается до −258 °C, и газы (азот, монооксид углерода и метан) конденсируются на поверхности; затем под действием солнечной радиации они вступают в химическую реакцию с образованием толинов — темных красноватых соединений. Позже, когда поверхность спутника снова нагревается Солнцем, температура на полюсе поднимается до −213 °C, газы улетучиваются, и на поверхности остаются толины. Из-за более высокого альбедо Плутон холоднее, и на нем этот эффект выражен не так заметно.

Поверхность Харона демонстрирует мощные следы геологической активности, и не исключено, что его внутреннее строение является дифференцированным. Согласно некоторым моделям, под поверхностью этого спутника может содержаться жидкость.

### Малые тела Солнечной системы — астероиды и кометы

Термин «малое тело Солнечной системы» (small Solar system body, SSSB) принят Международным астрономическим союзом в 2006 г. для обозначения всех объектов Солнечной системы, не являющихся классическими планетами (от Меркурия до Нептуна) или планетами-карликами (Плутон и др.). Таким образом, в группу SSSB попали все кометы, все астероиды внутри орбиты Юпитера (за исключением Цереры, отнесенной к планетам-карликам), все «кентавры» (*centaur*), движущиеся между орбитами планет-гигантов, все «троянцы», движущиеся по орбитам планет синхронно с ними, а также почти все объекты за орбитой Нептуна (trans-Neptunian object, TNO), кроме Плутона, Макемаке, Хаумеи и Эриды, отнесенных к планетам-

карликам. Спутники планет не входят в число малых тел Солнечной системы.

Традиционно астрономы называют астероидами небольшие каменные тела, а кометами — небольшие ледяные объекты. Разумеется, в состав и тех и других входит и минеральное вещество (включая металлы), и замерзшие газы (льды), просто у астероидов преобладает тугоплавкое вещество, а у комет — летучее. В этом смысле деление малых тел на астероиды и кометы напоминает деление планет на землеподобные и газово-ледяные, хотя порой трудно отнести конкретное тело к тому или иному типу.

А что означает «небольшие тела»? Это значит, что своей гравитацией они не способны преодолеть собственную жесткость и придать своему телу более или менее сфероидальную форму, т. е. привести свои недра в состояние гидростатического равновесия. Расчеты показывают, что ледяные тела принимают округлую форму при диаметре более 400 км, а льдисто-каменистые тела типа Цереры — при диаметре более 900 км. Наблюдения подтверждают это: планета-карлик Церера диаметром 946 км шарообразна при небольшом полярном сжатии, вызванном осевым вращением, а крупнейшие астероиды Веста (573×557×446 км), Паллада (550×516×476 км) и Гигея (530×407×370 км) заметно угловаты.

### *Астероиды*

Размеры астероидов намного меньше, чем обычных планет, поэтому раньше астероиды называли малыми планетами. В последнее время термин «малые планеты» употреблять не рекомендуется, чтобы не возникало путаницы с официально принятым термином «планеты-карлики», прототипом которых стал Плутон и в число которых попал крупнейший астероид — Церера. После выделения планет-карликов в самостоятельную группу среди астероидов действительно остались только твердые тела, вещество которых способно сопротивляться гравитационному сжатию. По этой причине астероиды менее подвержены внутренней эволюции, чем планеты: например, для недр астероидов не характерна, хотя и возможна, гравитационная дифференциация вещества. Кроме того, они слабее сопротивляются внешним факторам — ударной переработке поверхности и эволюции орбиты. В этом смысле после выделения планет-карликов класс астероидов стал более однородным. Однако при описании астероидов до сих пор нередко упоминают и Цереру — как в силу традиции, так и по

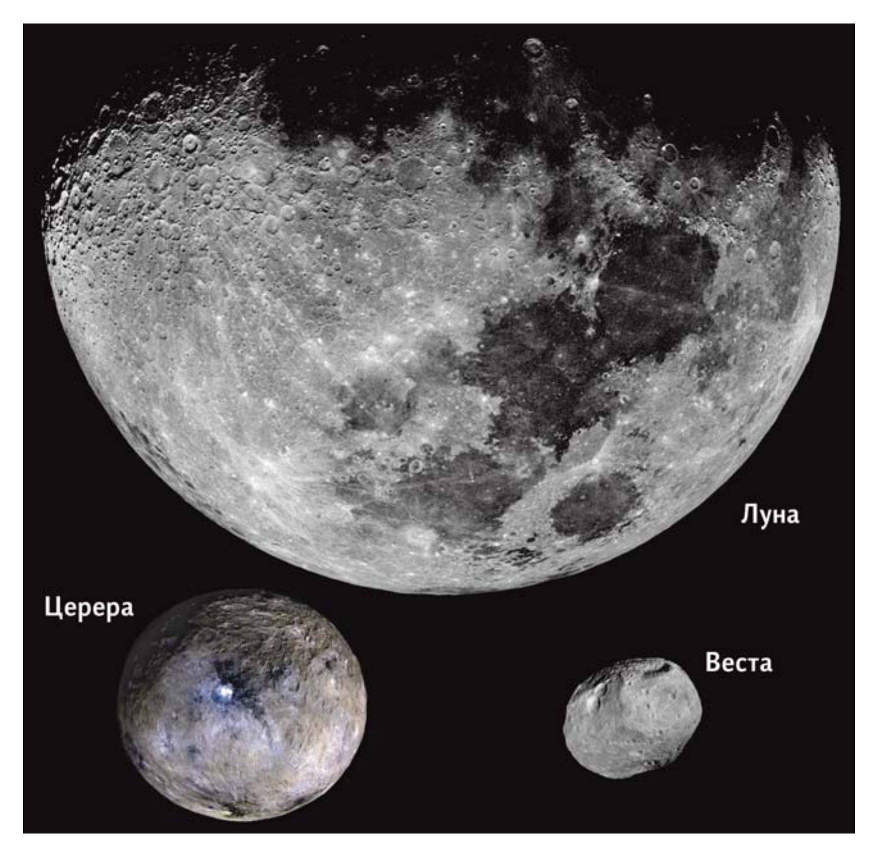



**Рис. 7.10.** Луна, планета-карлик Церера и крупнейший астероид Веста в одином масштабе. Фото Весты и Цереры получены космическим зондом «Dawn» (NASA) соответственно в 2011 и 2015 гг.

причине ее пограничного положения, позволяющего считать это тело переходным между астероидами и планетами-карликами.

До появления современных телескопов с ПЗС-камерами астероиды открывали в основном в пространстве между орбитами Марса и Юпитера, получившем название «Главный пояс астероидов». Постепенно, по мере совершенствования астрономической техники, кроме классических астероидов Главного пояса наблюдатели стали обнаруживать все больше объектов внутри орбиты Марса и даже внутри орбиты Земли, а также за орбитой Юпитера и даже Сатурна. Тем не менее в пределах орбит больших планет, т. е. до расстояния 40 а. е. от Солнца, подавляющая доля астероидов все же населяет именно Главный пояс между орбитами Марса и Юпитера.

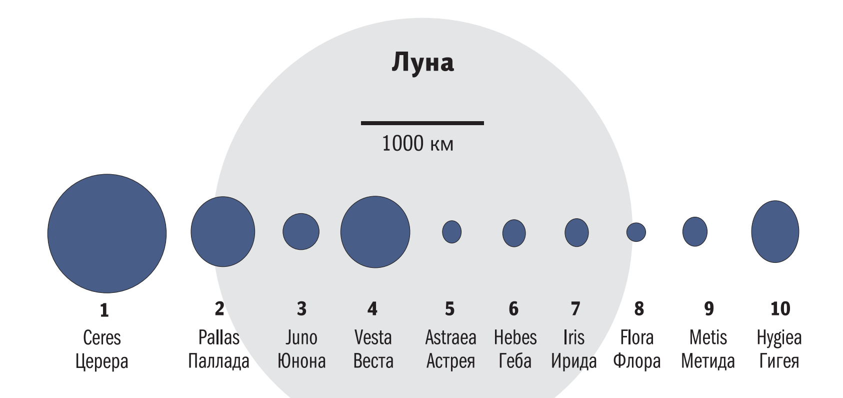



**Рис. 7.11. Сравнительные размеры Луны и первых (в порядке обнаружения) десяти астероидов. Крупнейший из них — Церера — теперь относится к семейству планет-карликов.**

Говорить о детальном изучении далеких астероидов пока не приходится, но внутри орбиты Юпитера они изучены неплохо. Крупных тел среди них мало: только у 30 из них диаметр превышает 200 км, еще около 170 тел имеют диаметры от 200 до 100 км; количество астероидов с диаметрами более 10 км оценивается в 10 000, а с диаметром более 1 км — порядка 750 000. Поэтому не исключено, что скоро будут «инвентаризованы» все астероиды диаметром более 1 км, которые могут представлять угрозу для земной биосферы в целом. По оценкам, в Солнечной системе существуют миллионы астероидов размером с крупный булыжник.

В 2018 г. полное число зарегистрированных астероидов перевалило за 780 000; количество астероидов с надежно вычисленными орбитами, получивших порядковые номера, вплотную приблизилось к 524 000, а собственные имена присвоены уже приблизительно 22 тысячам астероидов. Текущую статистику астероидов и комет можно найти здесь: https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary, а список собственных имен астероидов — здесь: https://www.minorplanetcenter.net/iau/lists/MPNames.html.

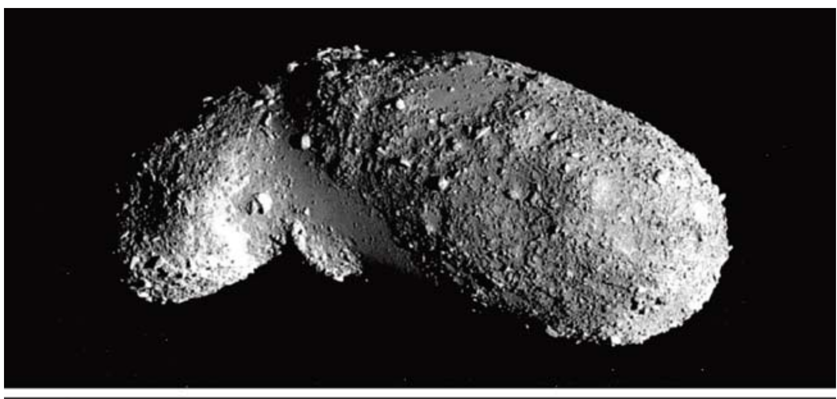
Обсуждая Цереру, мы уже выяснили, что полная масса вещества в Главном поясе астероидов невелика: сейчас она оценивается в $3 \cdot 10^{21}$ кг (т. е. 4% массы Луны) и в будущем существенно не возрастет, поскольку основное вещество сосредоточено в самых крупных телах. Например, в четырех крупнейших из них (Церера, Веста, Пал-

лада, Гигея) в сумме содержится 51% массы Главного пояса. С уменьшением размера и массы астероидов их число возрастает, но не очень быстро. Даже если будут открыты еще сотни тысяч мелких тел, это незначительно изменит полную массу Главного пояса. За орбитой Плутона — в поясе Койпера и далее — вещества может быть существенно больше, чем в Главном поясе астероидов. Но далекие области Солнечной системы изучены пока недостаточно.

Все астероиды, как и вообще все космические объекты, вращаются вокруг своей оси. Данные о вращении нескольких из них получены путем прямых наблюдений их поверхности с борта межпланетных зондов. Для изучения формы и скорости вращения астероидов, сближающихся с Землей, используется радиолокация, а о вращении и форме остальных астероидов свидетельствует переменность их оптического блеска: период переменности соответствует периоду вращения, а амплитуда переменности указывает на отличие формы тела от сферы с однородной поверхностью. Этим методом исследовано уже около 16 тыс. астероидов.

Периоды вращения астероидов заключены в очень широких пределах — от долей минуты до двух месяцев. Но у большинства из них период составляет от 2 до 20 час.  Центробежным силам, связанным с вращением и стремящимся разорвать тело астероида, препятствуют прочность его вещества и самогравитация. У небольших тел основную роль играет прочность, у крупных — гравитация. Самые медленно вращающиеся астероиды — это 846 Lipperta (период 1641 час = 68,4 сут), 912 Maritima (1332 час) и 9165 Raup (1320 час). Все они крупные, диаметром от 4,6 до 82 км. С другой стороны, все быстро вращающиеся астероиды очень маленькие, диаметром порядка 10 м. Их периоды начинаются от 16 сек, хотя каменный монолит такого размера мог бы вращаться значительно быстрее. Это говорит о рыхлой структуре астероидных тел.

Многие астероиды имеют форму земляного ореха или гантели, что с большой вероятностью указывает на мягкое столкновение и слипание отдельных тел в прошлом. Яркий пример — астероид Итокава, две половинки которого по своей средней плотности различаются в 1,6 раза (рис. 7.12). Обнаружено немало двойных астероидов и даже тройные, у которых отдельные части не находятся в прямом контакте друг с другом, а обращаются вокруг общего центра масс. У многих астероидов километровых размеров есть маленькие спутники размером в десятки и сотни метров, обращающиеся на рас-



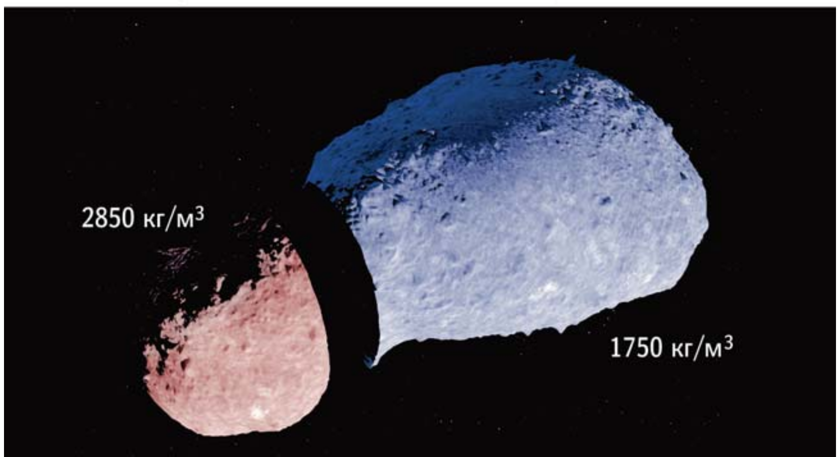



**Рис. 7.12.** ***Вверху:*** **астероид Итокава (25143 Itokawa) размером 535×294×209 м (фото: межпланетный зонд «Хаябуса», Япония).** ***Внизу:*** **схематическое изображение астероида, на котором указана средняя плотность двух его частей.**

стоянии от единиц до тысяч километров от главного тела. Происхождение таких астероидных систем может быть связано как с центробежным разрывом одного тела, так и со столкновением двух тел.

Классификация астероидов основывается на параметрах их орбит и спектрах солнечного света, отраженного и поглощенного, а затем переизлученного их поверхностью. Для подавляющего числа астероидов пока измерены лишь эти их характеристики. Исследования астероидов с близкого расстояния с помощью космических зондов пока продвинулись не слишком далеко: к середине 2018 г. межпланетные аппараты 9 раз пролетали вблизи астероидов, трижды выходили на орбиту вокруг них (это были Эрос, Итокава и Веста) и





**Рис. 7.13** *(вверху)*. **Астероид 243 Ида и ее маленький спутника Дактиль. Фото сделано зондом «Галилео» (NASA) в 1993 г. с расстояния 10 500 км. Длина Иды — 58 км, а ее ось вращения ориентирована вертикально с небольшим наклоном вправо.**

**Рис. 7.14. Дактиль — спутник 243 Иды. Размеры Дактиля 1,2×1,4×1,6 км. Неизвестно, является он осколком Иды или был захвачен ею из числа самостоятельных астероидов. Снимок сделан 28 августа 1993 г. зондом «Галилео» с расстояния около 4000 км, за 4 минуты до его наиболее тесного сближения с астероидом Ида.**

дважды касались их поверхности (Эрос, Итокава). При этом лишь с поверхности Итокавы были доставлены на Землю несколько крупиц вещества. До сих пор не было ни одной успешной посадки на поверхность астероидов и исследования их недр.

По параметрам орбит астероиды принято делить на *группы* и *семейства*.

Группы астероидов — это относительно свободные образования, связанные каким-либо одним параметром орбиты; пример — группа астероидов, пересекающих орбиту Меркурия (или Венеры, или Земли...). Еще пример — группа астероидов, движущихся синхронно с какой-либо планетой вдоль ее орбиты в окрестности точек либрации $L_4$ и $L_5$. Такие астероиды называют троянцами данной планеты; особенно много троянцев у Юпитера. Нередко группы делятся на подгруппы, или типы. Например, троянцы Юпитера состоят из

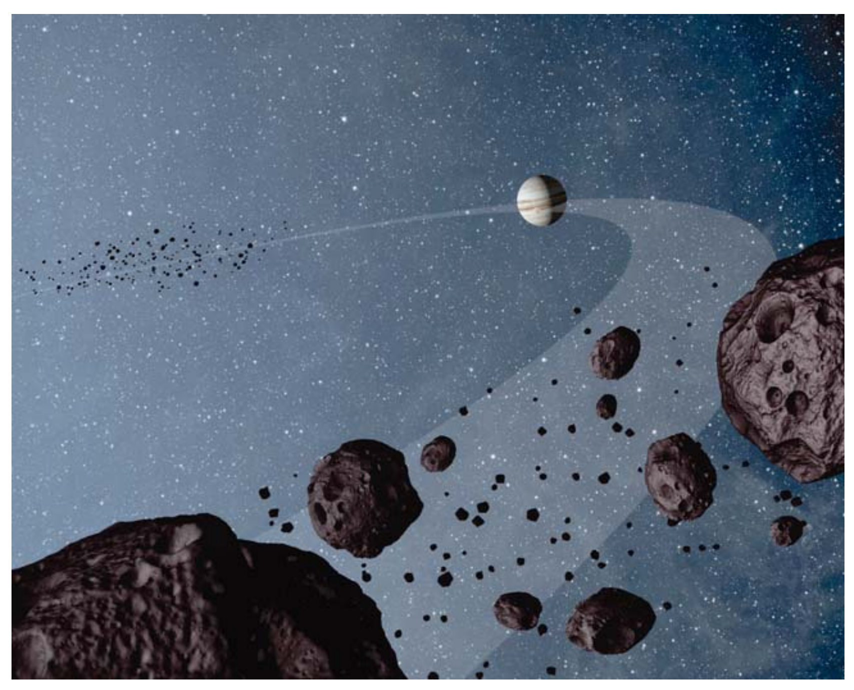


**Рис. 7.15.** Астероиды «греки» и «троянцы» на орбите Юпитера в районе точек Лагранжа $L_4$ и $L_5$ (рисунок)

двух подгрупп, одна из которых отстает от Юпитера вдоль его орбиты на 60° (это собственно троянцы), а другая опережает его на те же 60° (это греки).

Обычно группа или подгруппа получает название по имени первого астероида, который был обнаружен на орбите данного типа. Например, группа астероидов, пересекающих орбиту Земли, состоит из двух подгрупп — Атона и Аполлона. У астероидов типа Атона (2062 Aten) большая полуось орбиты меньше, чем у Земли, но расстояние в афелии больше перигелийного расстояния Земли; эти астероиды в основном движутся внутри орбиты Земли и только в окрестности афелия могут ее пересечь. У астероидов типа Аполлона (1862 Apollo) перигелийное расстояние меньше, чем афелийное расстояние Земли, поэтому они могут проникать внутрь земной орбиты и при этом пересекать ее.

Более обширную группу составляют астероиды, сближающиеся с Землей (Near-Earth Asteroids = NEA), перигелийные расстояния которых не превышают 1,3 а. е. Кроме подгрупп Атона и Аполлона,

к ним относятся астероиды типа Амура (1221 Amor) и Атиры (163693 Atira). Первые движутся вне орбиты Земли, а вторые — внутри нее. Астероиды этих четырех типов — Атона, Аполлона, Амура и Атиры — иногда называют АААА-астероидами. Из их числа выделяют потенциально опасные астероиды (Potentially Hazardous Asteroids = PHA), орбиты которых сближаются с орбитой Земли менее чем на 0,05 а. е. (около 7,5 млн км). В середине 2018 г. было известно 18 433 NEA и 1922 PHA.

Генетической связи между астероидами, входящими в одну группу или подгруппу, обычно нет. Под действием гравитационных возмущений со стороны массивных планет астероиды нередко меняют свои орбиты и поэтому могут переходить из одной группы в другую.

Иное дело — семейства астероидов. В смысле особенностей движения их членов это более однородные коллективы, близкие друг к другу по нескольким орбитальным параметрам. В 1915–1918 гг. японский астроном Кийогуцу Хираяма (1874–1943) впервые выделил 5 семейств астероидов: Флоры, Фемиды, Эос, Корониды и Марии, которые обычно называют семействами Хираямы. Он обнаружил, что члены каждого такого динамического семейства имеют сходные орбитальные элементы — большую полуось, эксцентриситет и наклонение орбиты, — что, вероятно, указывает на их генетическое родство. Возможно, это осколки одного родительского тела, разрушенного столкновением. Сейчас, открыв сотни тысяч новых астероидов, астрономы выделяют среди них 20÷30 густонаселенных семейств и около сотни малонаселенных. Почти 35% астероидов Главного пояса входят в состав семейств. Общая точка зрения по-прежнему состоит в том, что семейства образовались при разрушении крупных астероидов от столкновений с себе подобными.

Физическая классификация астероидов фактически основывается на оптических свойствах их поверхности. Измеряются альбедо в видимом диапазоне спектра, цвет и спектр инфракрасного излучения. Высоким геометрическим альбедо обладает только Веста ($A = 0{,}42$) и ее «родственники» — вероятные осколки. У большинства же астероидов поверхность темная ($A = 0{,}05 \div 0{,}2$).

Исходная спектральная классификация астероидов была очень простой: в ней выделяли всего три типа — C, S и U.

К типу C (от *carbonaceous*) относили объекты с очень темной ($A = 0{,}03 \div 0{,}10$) углеродистой поверхностью. К этой группе принадлежат 75% всех известных астероидов.

К типу S (от *silicaceous*) относили объекты с более светлой (*A* = 0,10÷0,22) силикатной, «каменной» поверхностью. К этой группе принадлежат 17% астероидов. Среди них небольшую подгруппу составляют астероиды М-типа (от *metal*), в спектре которых обнаруживаются признаки свободного металла.

К типу U (от *unclassified*) относили оставшиеся 8% тел, не поддававшиеся простой классификации.

Ныне, благодаря измерениям в ближнем ИК-диапазоне, спектральная классификация астероидов значительно расширена и детализирована. В ней выделено множество новых и переходных типов и подтипов.

Как оказалось, орбитальные и спектральные характеристики астероидов статистически взаимосвязаны. Во внутренней части Главного пояса астероидов, т. е. ближе к Солнцу, преобладают тела S-типа, а во внешней его части, дальше от Солнца, — тела С-типа. Расчеты небесных механиков показали, что астероиды Главного пояса движутся по устойчивым орбитам, слабо эксцентричным или близким к круговым. Они находятся в «безопасной» зоне, где минимально гравитационное влияние на них больших планет, в первую очередь Юпитера. Поэтому считается, что пространственное разделение астероидов с разным типом поверхности, т. е. состоящих из вещества разного типа, отражает исходное состояние Солнечной системы, фактически структуру протопланетного диска.

Хотя общие закономерности распределения астероидов кажутся понятными, при подробном изучении отдельных малых тел выясняется, что каждое из них уникально и имеет свою собственную, иногда весьма драматическую историю. Например, члены динамических семейств астероидов (Фемиды, Флоры, Гильды, Эос и др.), очевидно имеющие общее происхождение, заметно различаются по оптическим характеристикам, что указывает на какие-то их особенности.

Как это часто бывает в любой области науки, чем детальнее исследуется объект, тем сложнее его классифицировать и отнести к какой-либо уже существующей группе. Например, крупнейший из астероидов — Весту — нельзя считать типичным именно потому, что он был исследован значительно детальнее других, когда на орбите вокруг него в 2011–2012 гг. работал космический зонд «Dawn». Поверхность Весты неоднородна: одно ее полушарие более светлое, а другое — более темное, причем там встречаются участки с аномально низким альбедо. Считается, что более темные области соот-



**Рис. 7.16.** Астероид Веста. Фото сделано зондом «Dawn» (NASA) в 2012 г.

ветствуют базальтовым равнинам типа лунных морей, а более светлые — сильно кратерированным возвышенностям. Веста заметно плотнее близкого к ней по размерам астероида Паллада (соответственно 3,5 и 3,0 г/см$^3$). Расчеты показывают, что вскоре после формирования Весты началась дифференциация ее недр: образовались железо-никелевое ядро и каменная мантия. За счет тепла от распада радиоактивных изотопов ядро и значительная часть мантии Весты расплавились. В последующие эпохи происходило постепенное остывание и кристаллизация пород мантии и коры, что и привело к чрезвычайному разнообразию минералов, составляющих Весту.

В целом фигура Весты вполне шарообразна, если не считать обширной депрессии в районе южного полюса. Именно это не позволяет включить ее в группу планет-карликов. Вероятно, миллиарды лет назад Веста испытала сильный удар в область южного полюса, и оттуда откололась заметная доля массы астероида. На фотографиях видны следы этого удара — складки вдоль экватора Весты. Вероятно, это результат сжатия, вызванного ударом. Многие мелкие астероиды в Главном поясе — это обломки Весты, разлетевшиеся после

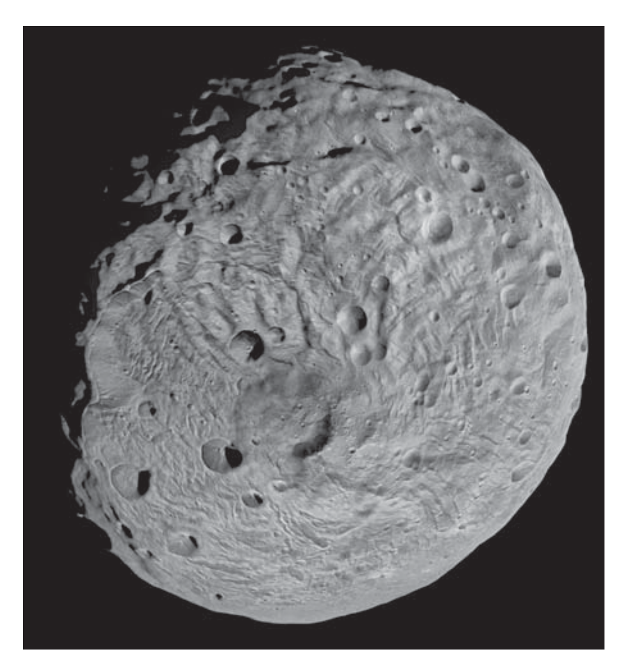


**Рис. 7.17.** Южный полюс Весты. Концентрические кольцеобразные структуры могут быть следствием ударного воздействия или результатом внутренних геологических процессов.

того грандиозного столкновения; их легко узнать по высокому альбедо. И среди падающих на Землю метеоритов тоже нередко попадаются ее осколки.

На память об этом столкновении осталась и самая заметная деталь на поверхности Весты — огромный ударный кратер Реясильвия диаметром 500 км в районе южного полюса. Размер кратера почти равен диаметру самого астероида. Любопытно, что позже практически туда же пришелся еще один удар, оставивший после себя кратер диаметром около 400 км. Остается загадкой, как Веста смогла пережить столь чудовищные катаклизмы. Спектральный анализ показывает, что эти удары обнажили несколько слоев коры Весты и частично — ее мантию. Кратер Реясильвия — один из самых глубоких в Солнечной системе. По периметру его окружает вал с высотой стенок от 4 до 12 км, а дно кратера лежит на 13 км глубже соседней поверхности. В центральной части кратера возвышается гора высотой от подножия около 22 км и диаметром 180 км; это одна из высочайших вершин в Солнечной системе.

В XX веке изучение астероидов в основном стимулировалось задачами космогонии: их изучали как строительные блоки, оставшиеся невостребованными после формирования планет. В XXI веке ста-

ли актуальны два новых направления: защита Земли от столкновения с астероидами и использование вещества астероидов для строительства и производства в космосе. Первое из этих направлений в основном развивается государственными усилиями (хотя свой вклад вносят и любители астрономии), а второе в немалой степени привлекает частный капитал. В целом изучение астероидов считается сейчас очень важной задачей астрономии и космонавтики.

### *Кометы*

Обычно мы представляем себе кометы этакими хвостатыми светилами. Но хвостатыми они бывают редко и недолго. Комета, коротко говоря, — это просто большая ледяная глыба, которая, двигаясь по вытянутой орбите, вдали от Солнца остается холодной и не испаряется, а когда подлетает к источнику тепла, начинает нагреваться и испаряться. Вокруг твердого ядра кометы возникает обширная временная атмосфера — *кома*, рассеивающая и переизлучающая солнечный свет, поэтому комета становится видна на ночном небе, нередко даже невооруженным глазом. Но, удаляясь от Солнца, она вновь замерзает и становится практически невидимой.

По мере приближения кометы к Солнцу у нее обычно «вырастает хвост». Причина в том, что выброшенные из ядра кометы атомы, молекулы и пылинки ощущают давление солнечного света, т. е. потока квантов, испущенных Солнцем, а также давление солнечного ветра, т. е. замагниченной плазмы, летящей от Солнца.

Пылинки — это мелкие твердые частицы. Давление на них солнечного света отчасти компенсирует гравитационное притяжение к Солнцу, поэтому кривизна орбит пылинок уменьшается, они начинают удаляться от траектории ядра кометы и отставать от него. За кометой образуется пылевой хвост. А заполняющие кому молекулы газа под действием жесткого солнечного излучения — ультрафиолетового и рентгеновского — распадаются на атомы и теряют электроны: происходит диссоциация и ионизация газа. Заряженные частица газа активно взаимодействуют с потоками солнечного ветра, давление которого благодаря «вмороженному» в него магнитному полю намного превосходит гравитацию Солнца. Поэтому газовый, а по сути плазменный хвост кометы всегда направлен в сторону от Солнца. По мере удаления от головы кометы пылевой и плазменный хвосты разделяются. Поэтому обычно у комет два хвоста: голубоватый плазменный и желтовато-белый пылевой. Но бывают и варианты.



**Рис. 7.18.** Комета Хейла—Боппа (C/1995 O1) в марте 1997 г.

К тому же структура каждого из хвостов порою весьма сложна и зависит от порывов солнечного ветра и поведения газовых фонтанов на ядре кометы.

Так что хвосты комет, помимо того, что они очень красивы, еще и весьма информативны, ибо рассказывают нам, как ядро кометы вращается и что происходит на его поверхности. Это видно по неоднородности пылевого хвоста. В 2007 г. наблюдалась замечательная комета Макнота (C/2006 P1), или Большая комета 2007 года. Особенно хорошо она была видна на южном небе (рис. 7.19). Неоднородность ее хвоста показывала, что ядро вращается и область на нем, активно выбрасывающая газ, то нагревается Солнцем, то остывает.

Хвосты такого типа, как у кометы Макнота, напоминают сильно изогнутый конус, отклоненный назад. Они образованы пылинками разной величины, выброшенными из ядра. В таких хвостах часто наблюдаются полоски — так называемые *синхроны*. Они возникают при единовременном (синхронном) выбросе из ядра кометы целого облака частиц, которые затем движутся с различным ускорением, поскольку световое давление действует по-разному на пылевые частицы разного размера.



**Рис. 7.19.** Комета Макнота (C/2006 P1 McNaught), сфотографированная 19 января 2007 г. с горы Сьерро-Паранал (Евопейская южная обсерватория, Чили). В хвосте кометы отчетливо видны синхроны. Фото: ESO.

Внешние слои кометных ядер могут заметно отличаться по своим свойствам от вещества в глубине ядра. Хотя водяной лед составляет значительную долю кометного вещества, наблюдения комет (Галлея, Хартли-2, Чурюмова—Герасименко и др.) показывают, что поверхность ядер очень темная, сухая и богатая нелетучей органикой.

Твердые ядра комет невелики по размеру: диаметры тех, что были изучены космическими зондами с близкого расстояния, составляют от 1 до 10 км. Несмотря на то, что ядро кометы в основном ледяное, его поверхность весьма темная ($A \approx 0{,}03 \div 0{,}05$), поэтому с расстояния в несколько астрономических единиц такой объект уже не виден даже в хороший телескоп. Видимость комете придают лишь испаряющиеся с ее поверхности газы и унесенные ими мелкие твердые частицы — пылинки. Хвосты комет достигают видимых размеров во многие миллионы километров, и, хотя они очень прозрачны, рассеянный ими солнечный свет делает комету заметной даже для невооруженного глаза.

Орбиты абсолютного большинства наблюдавшихся комет сильно вытянуты, порой близки к параболическим. Иного и быть не мо-

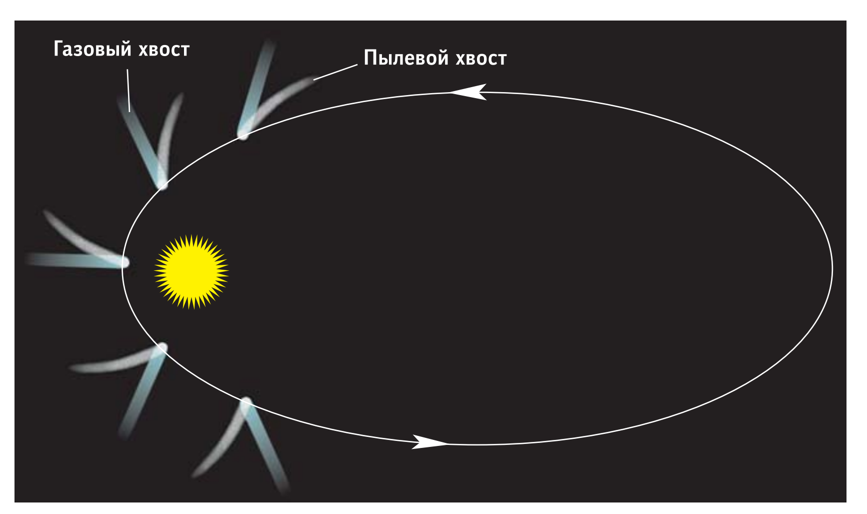



**Рис. 7.20.** Схема формирования хвостов кометы.

жет. На орбите, близкой к круговой, комета вблизи Солнца быстро испарилась бы, а вдали от Солнца не испарялась бы совсем и оставалась невидимой. Поэтому мы наблюдаем только те кометы, которые на короткое время подходят к Солнцу, а затем надолго удаляются от него, сохраняя свое ледяное тело. За всю историю астрономических наблюдений к середине 2018 г. было зарегистрировано немногим более 4000 комет. Текущую статистику можно найти на https://www.minorplanetcenter.net/mpc/summary.

Современные модели «новых» комет представляют ядро как очень рыхлое образование, типа гигантского снежного кома. После многократных прохождений близ Солнца «новая» комета стареет, ее ядро уменьшается за счет потери большей части летучих веществ из поверхностного слоя и покрывается темной коркой из нелетучих соединений, как мартовский сугроб в городе.

Сложная структура кометных хвостов и газовые струи, истекавшие с поверхности наблюдавшихся вблизи кометных ядер, указывают на то, что структура поверхности ядра крайне неоднородна. Вероятно, в поверхностной теплоизолирующей корке имеются дыры, трещины или другие обнажения подкоркового вещества с высоким содержанием летучих соединений, из которых происходит интенсивная сублимация этих веществ, вплоть до истечения мощных газовых струй, способных вызывать реактивное ускорение кометного ядра, заметно меняющее его орбиту.

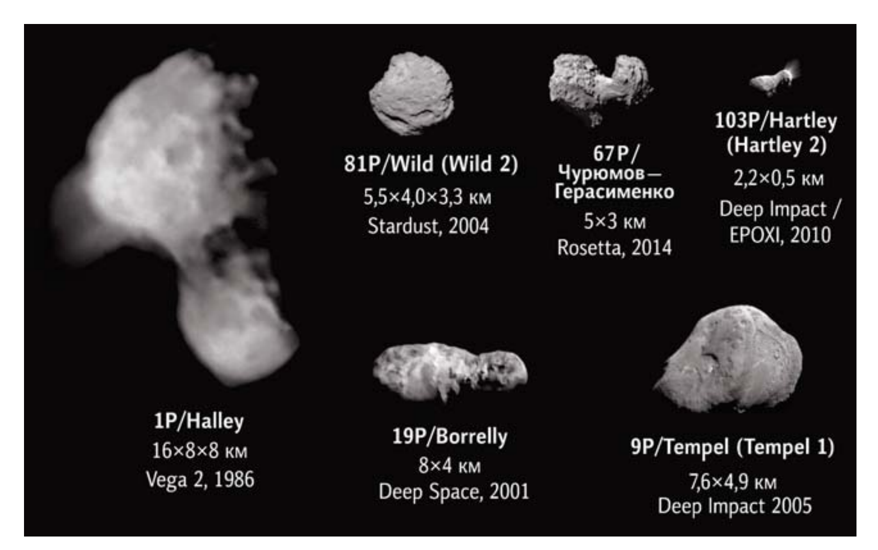



**Рис. 7.21.** Кометы, к которым осуществлялись миссии автоматических зондов. Фотографии ядер комет предоставлены РАН, NASA, ESA.

Сильное впечатление оставляют снимки ядра кометы Чурюмова—Герасименко, переданные орбитальным аппаратом «Розетта» Европейского космического агентства. Мы видим (рис. 7.23), как газы с ее поверхности активно уходят в пустоту со скоростью звука и даже быстрее. Скорость полета частиц около 1 км/с — это сверхзвуковая скорость. Видно, что комета неоднородно извергает вещество. Некоторые области ее поверхности активны, а другие спокойны. Вероятно, выбросы газа и пыли происходят там, где солнечное тепло проникает сквозь темную и довольно прочную кору кометы, нагревает лежащие под ней льды и вызывает их испарение (возгонку). Давле-



**Рис. 7.22.** Ядро кометы Хартли 2 (103P/Hartley) размером 2,2÷0,5 км, имеющее чрезвычайно темную поверхность с альбедо $A = 0{,}028$ и форму, напоминающую нечто среднее между кеглей для боулинга и огурцом (фото: космический зонд «Deep Impact», NASA, 4 ноября 2010).



**Рис. 7.23. Ядро кометы Чурюмова–Герасименко с потоками испаряющегося вещества. Фото зонда «Розетта» (ESA, NASA), 2014 г.**

ние повышается, газ прорывается через кору и выбрасывается наружу вместе с пылью.

Массы ядер комет, вероятно, лежат в пределах от нескольких тонн (мини-кометы размером в метры) до $10^{11}$–$10^{12}$ т («айсберги» размером в десятки километров). Измерить массу точно удается лишь в том случае, если космический зонд движется по орбите вокруг ядра, а это до сих пор было лишь однажды — когда зонд «Rosetta» (ESA) в 2014–2016 гг. изучал комету Чурюмова–Герасименко (67P/C-G). При размере ее ядра примерно 5×3 км его масса составила $10^{10}$ т, а средняя плотность — 0,53 г/см$^3$. Пролеты зондов вблизи других ядер комет (1P/Halley, 9P/Tempel, 19P/Borrelly, 81P/Wild, 103P/Hartley) также указывают на их низкую плотность: от 0,3 до 0,6 г/см$^3$. Учитывая, что вещество кометы — это грязный лед с плотностью около 1 г/см$^3$, мы приходим к выводу о высокой пористости этого вещества. Примерно половина объема кометного ядра — это пустота. Но что это: мелкие поры или крупные каверны и пещерные лабиринты, — мы пока не знаем.

Какова продолжительность жизни кометы? Это зависит от ее орбиты. Если перигелий орбиты превышает 10÷15 а. е., комета испаряется очень медленно, а если при этом ее орбитальный период составляет сотни тысяч или миллионы лет, то она вообще практически не меняется и служит «вечным холодильником» протопланетного вещества. Но короткопериодические кометы, подлетающие к Солнцу на 1÷3 а. е., эволюционируют очень быстро и, соответственно, живут недолго. Например, комета 103P/Hartley имеет орбитальный период 6,5 года, афелий около 6 а. е. и перигелий около 1 а. е., то есть «живет» между орбитами Юпитера и Земли. При собственной массе около 300 млн тонн при каждом сближении с Солнцем она теряет около 1 млн тонн вещества, следовательно, ей суждено полностью испариться через несколько сотен оборотов, т. е. примерно через тысячу лет.

Еще один пример. Ядро кометы Галлея (1P/Halley) имеет картофелеобразную форму, длину около 15 км и ширину около 8 км. Ее орбитальный период 75,3 года, афелий 35 а. е. и перигелий 0,586 а. е. В момент прохождения перигелия комета каждую секунду теряет около 45 т газообразных соединений и 5÷8 т пыли. Легко подсчитать, что запасов летучего вещества комете Галлея должно хватить на сотню тысяч лет. За это время она может совершить еще около 1300 оборотов вокруг Солнца, а затем полностью «высохнет» и, вероятно, пополнит число вымерших комет. Это бывшие кометные ядра, которые уже не проявляют признаков активности и по наблюдаемым характеристикам ничем не отличаются от астероидов.



**Рис. 7.24.** **Ядро кометы Галлея и испаряющееся с него вещество. Фото космического зонда «Джотто», 1986 г.**

В последние десятилетия астрономы много спорили о роли астероидов и комет в обеспечении юной Земли водой и органическими веществами, необходимыми для зарождения и развития жизни. Выяснить, откуда на Земле вода, помогает ее изотопный состав. Среди молекул обычной воды $H_2O$ изредка попадаются молекулы тяжелой воды $D_2O$ и полутяжелой воды HDO, в которых атом легкого водорода (H) заменен полностью или частично его тяжелым изотопом — дейтерием (D). В химическом смысле это та же вода, поэтому никакие реакции не могут изменить соотношение изотопов D/H, которое у земной воды чуть больше, чем $10^{-4}$.

Как показывает анализ изотопного соотношения молекул воды земных океанов, астероидов и комет, скорее всего, вода на Землю была принесена астероидами Главного пояса, а не кометами. Оказалось, что в веществе комет отношение D/H в 2÷3 раза выше, чем в земной воде, зато у астероидов оно почти такое же, как на Земле. Впрочем, не исключено, что именно кометы снабдили нашу планету органическими веществами вплоть до аминокислот — «кирпичиков», из которых состоят белки земных организмов.

Первые намеки на наличие в составе комет глицина — простейшей аминокислоты — были получены в 2006 г., когда на Землю вернулась капсула зонда «Stardust» (NASA) с образцами вещества кометы Wild-2. Но тогда наличие глицина списали на земное загрязнение. Однако «Розетта» обнаружила глицин непосредственно на месте — в коме кометы Чурюмова—Герасименко.

Еще одним важным открытием «Розетты» стал фосфор — элемент, абсолютно необходимый для всех живых организмов Земли. Фосфор входит в состав ДНК, компонентов клеточных мембран, а также аденозинтрифосфата (АТФ) — универсального источника энергии для всех биохимических процессов, протекающих в живых системах. Многочисленные органические молекулы, обнаруженные «Розеттой» в веществе кометы, включая глицин и соединения фосфора, подтверждают идею, что кометы могут быть поставщиками ключевых молекул для предбиотической химии.

### Подарки от комет и астероидов

Изучение астероидов и комет «на месте» с помощью космических зондов — дело очень интересное, но чрезвычайно дорогое. Особенно сложно доставить их вещество на Землю для детального изучения. За всю историю космонавтики до сих пор (2018 г.) лишь од-

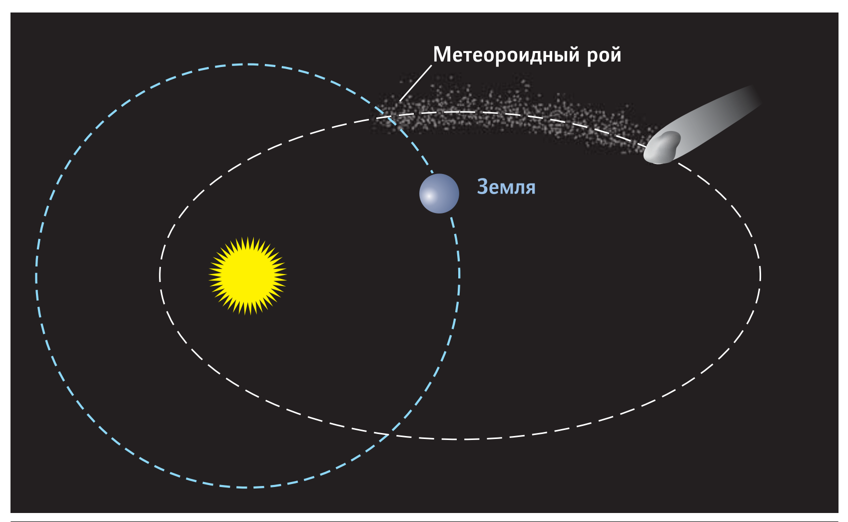



**Рис. 7.25.** Яркий метеор — болид над пустыней Мохаве (Калифорния). 2009 г.

нажды удалось добыть микроскопические частицы с поверхности астероида (25143 Itokawa, зонд «Hayabusa», Япония, 2010) и из хвоста кометы (81P/Wild, зонд «Stardust», NASA, 2006). Поэтому астрономы очень дорожат тем космическим веществом, которое само попадает на Землю, оставляя следы в атмосфере в виде метеоров или падая на поверхность планеты в виде метеоритов.

Пока твердая частица летает в космосе, мы называем ее *метеороидом*. Когда она с большой скоростью влетела в атмосферу Земли и, раскалившись и испаряясь от ударов молекул воздуха, движется, оставляя за собой светящийся плазменный след, — это *метеор*. А если она не до конца разрушилась и ее остаток упал на землю — это *метеорит*.

Вспышки обычных метеоров, по яркости сопоставимые со звездами, производят частицы массой в сотые доли грамма и размером не более миллиметра. Они полностью разрушаются на высотах около 80 км и до поверхности не долетают. Увидеть метеор можно в любое время года, но бывают сезоны, когда частота их вспышек значительно возрастает. Наблюдения показывают, что в эти сезоны метеороиды налетают на Землю в основном с одного направления, а значит, движутся в пространстве почти по одной и той же орбите. Это метеорные потоки. Их вызывают мелкие частицы, потерянные од-



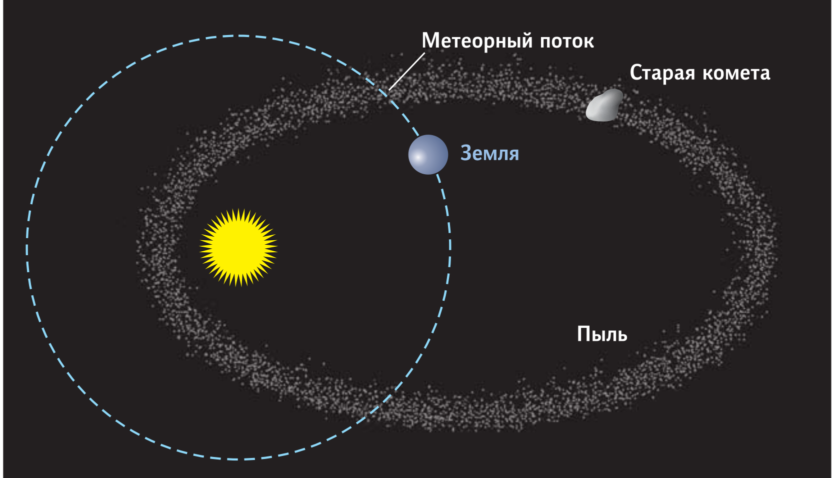




**Рис. 7.26.** **Теряя твердые частицы, комета постепенно заполняет окрестности своей орбиты мелкими метеороидами, которые, попадая в атмосферу Земли, вызывают метеорные потоки.**

ной из комет. При размерах в доли миллиметров такие частицы почти не поддаются давлению солнечного света и солнечного ветра, поэтому они долго движутся в окрестности кометной орбиты.

Каждый метеорный поток связан с той или иной кометой. Теряя частицы, комета постепенно заполняет ими окрестности своей орбиты. Если земная орбита пересекает в одном, а иногда и в двух местах траекторию кометы, то мы попадаем на несколько дней в

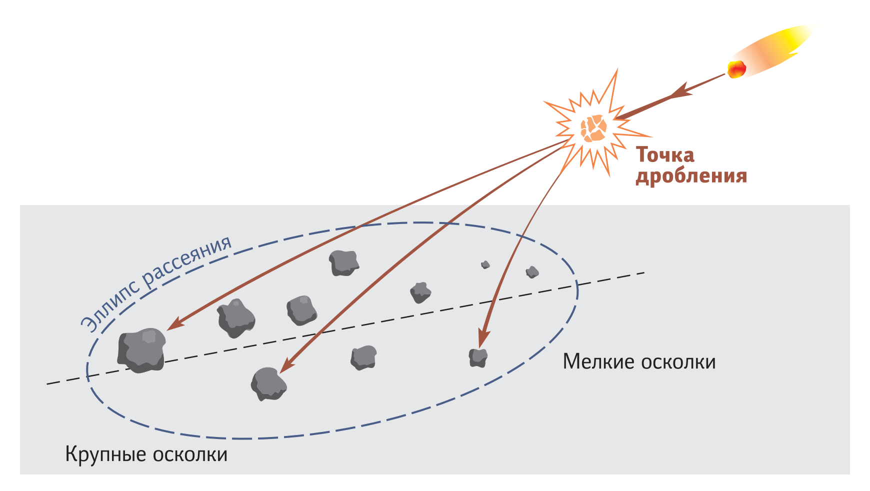



**Рис. 7.27.** Схема рассеивания осколков меторита.

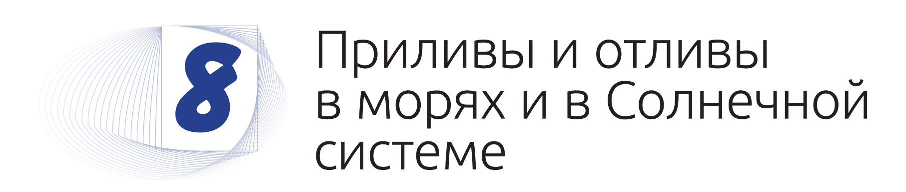
область, богатую мелкими метеороидами, и наблюдаем метеорный поток. Например, знакомый многим августовский метеорный поток Персеиды дарит нам комета 109P/Свифта—Тутля. А комета Галлея даже дважды пересекается с земной орбитой, и мы получаем от нее два метеорных потока в разные сезоны года: η-Аквариды в мае и Ориониды в октябре.

Хотя мелкие частицы комет до земли не долетают, изучая спектры их вспышек в атмосфере, т. е. метеоры, можно узнать кое-что о химическом составе твердого вещества кометы. Сами кометы или их крупные фрагменты врезаются в Землю нечасто (что приятно — вспомните о Тунгусском событии 1908 года), поэтому детально изучить эти явления до сих пор не удавалось. В принципе от попадания в Землю небольших комет могут оставаться метеориты, но если они ледяные, то долго не сохранятся. Ну разве что в Антарктиде или в Гренландии…

Влетая в атмосферу Земли и двигаясь вниз, метеороид попадает во все более плотные слои атмосферы. Его скорость велика, плотность воздуха, который на него налетает, растет, и вещество начинает разрушаться, дробиться на осколки разного размера. Крупные фрагменты тормозятся долго, мелкие — быстро, и в результате на Земле образуется «эллипс рассеивания» — зона, «посыпанная» осколками. Эти эллипсы бывают весьма большими — 2–15 км. Так что даже если вы точно вычислили место падения метеорита, не так просто собрать все его осколки.

Долго сохраняются на поверхности Земли каменные и железные метеориты, которые считаются осколками астероидов. Иногда по траектории полета в атмосфере удается восстановить исходную орбиту соответствующего метеороида и понять, из какой области Солнечной системы он пришел. Химический и минеральный состав самого метеорита в некоторых случаях помогает выяснить, от какого астероида он откололся. А некоторые метеориты надежно определяются как осколки лунной и марсианской поверхности. Поэтому метеориты — бесценный дар для исследователей Солнечной системы. Им мы посвятим отдельную главу в будущих изданиях этих Лекций.





# 8 Приливы и отливы в морях и в Солнечной системе

Продолжим разговор о силах, действующих на небесные тела, и возникающих при этом эффектах. В этой лекции я расскажу о приливах и негравитационных возмущениях. Что это значит — «негравитационные возмущения»? Возмущениями обычно называют малые поправки к большой, главной силе. Таким образом, речь пойдет о каких-то силах, влияние которых на объект значительно меньше гравитационных.

Какие в природе бывают силы, кроме гравитации? Сильные и слабые ядерные взаимодействия оставим в стороне, они имеют локальный характер (действуют на крайне малых расстояниях). А вот электромагнетизм, как известно, намного сильнее гравитации и распространяется так же далеко — беспредельно. Но поскольку электрические заряды противоположных знаков обычно уравновешены, а гравитационный «заряд» (его роль играет масса) всегда одного знака, то при достаточно больших массах, конечно же, гравитация выходит на первый план. Так что реально мы будем говорить о возмущениях движения небесных тел под действием электромагнитного поля. Больше вариантов нет, хотя есть еще темная энергия, но она действует лишь на космологических (т. е. очень больших) расстояниях.

Как я рассказывал в одной из предыдущих лекций, простой ньютонов закон тяготения

$$F = \frac{GMm}{R^2}$$

очень удобно использовать в астрономии, потому что большинство тел имеют близкую к сферической форму и достаточно удалены друг от друга, так что при расчете их можно заменить точками — точечными объектами, содержащими всю их массу. Но тело конечного размера, сравнимого с расстоянием между соседними телами, все-таки испытывает разное силовое влияние в разных своих частях, потому что эти части по-разному удалены от источников гравитации, и это нужно учитывать.

### Притяжение плющит и раздирает

Чтобы ощутить приливный эффект, проделаем популярный у физиков мысленный эксперимент: представим себя в свободно падающем лифте (рис. 8.1). Отрезаем веревочку, удерживающую кабину, и начинаем падать. Пока не упали, можем смотреть, что вокруг нас происходит. Подвешиваем свободные массы и наблюдаем, как они себя поведут. Сначала они падают синхронно, и мы говорим, что это невесомость, потому что все объекты в этой кабине и она сама ощущают примерно одинаковое ускорение свободного падения. Но со временем наши материальные точки начнут менять свою конфигурацию, потому что нижняя из них вначале была чуть ближе к центру притяжения, чем верхняя, поэтому нижняя, притягиваясь сильнее, начинает опережать верхнюю. А боковые точки всегда остаются на одинаковом расстоянии от центра тяготения, но по мере приближения к нему они начинают сближаться друг с другом, поскольку равные по модулю ускорения не параллельны. В результате система несвязанных объектов деформируется. Это и называют приливным эффектом.

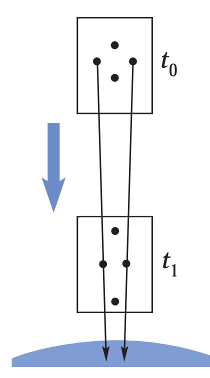


**Рис. 8.1. Деформация системы несвязанных точек при свободном падении.**

С точки зрения наблюдателя, который рассыпал вокруг себя крупу и смотрит, как перемещаются отдельные крупинки, пока вся система падает на массивный объект, можно ввести такое понятие, как *поле приливных сил*. Определим эти силы в каждой точке как векторную разницу гравитационного ускорения в этой точке и ускорения наблюдателя или центра масс, и если брать только первый член разложения в ряд Тейлора по относительному расстоянию, то получится симметричная картина (рис. 8.2): ближние крупинки будут опережать наблюдателя, дальние — отставать от него, т. е. система будет растягиваться вдоль оси, направленной на тяготеющий объект, а вдоль перпендикулярных ей направлений частицы будут прижиматься к наблюдателю.

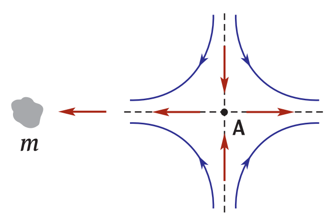
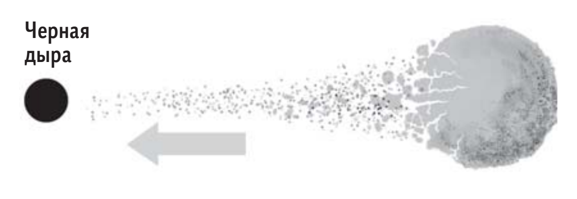


**Рис. 8.2. Векторное поле приливных сил в точке A под действием объекта массой *m*.**

Как вы думаете, что будет происходить при затягивании планеты в черную дыру? Тем, кто не слушал лекций по ас-

**Рис. 8.3.** Художник, не слушавший лекций по астрономии, нарисовал, как разрушалось бы крупное небесное тело при засасывании в черную дыру. В чем его ошибка?




трономии, обычно кажется, что черная дыра будет срывать вещество только с обращенной к ней поверхности. Они не знают, что почти столь же сильный эффект проявляется на обратной стороне свободно падающего тела, т. е. оно разрывается в двух диаметрально противоположных направлениях, а отнюдь не в одном.

## Опасности открытого космоса

Чтобы показать, насколько важно учитывать приливный эффект, возьмем Международную космическую станцию. Она, как и все спутники Земли, свободно падает в гравитационном поле (если не включены двигатели). И поле приливных сил вокруг нее — это вполне ощутимая вещь, поэтому космонавт, когда работает на внешней поверхности станции, обязательно привязывает себя к ней, причем, как правило, двумя тросиками — на всякий случай, мало ли что может случиться (рис. 8.5). Окажись он непривязанным в том месте, где приливные силы оттягивают его от центра станции, он запросто может потерять с ней контакт. Такое часто бывает с инструментами, ведь все их



**Рис. 8.4. Международная** космическая станция в свободном полете над Землей.



**Рис. 8.5.** Согласно инструкции, при работе в открытом космосе обязательна двойная страховка.

не привяжешь. Если предмет выпал у космонавта из рук, то он уходит куда-то вдаль и становится самостоятельным спутником Земли.

План работ на МКС включает испытания в открытом космосе индивидуального реактивного ранца. И когда его двигатель отказывает, приливные силы уносят космонавта, и мы его теряем; имена пропавших без вести засекречиваются. Это, конечно, шутка: подобного происшествия пока еще, к счастью, не было. Но такое вполне могло бы произойти! И, возможно, когда-нибудь случится.

### Планета-океан

Вернемся к Земле. Это самый интересный для нас объект, и действующие на него приливные силы ощущаются вполне заметно. Со стороны каких небесных тел они действуют? Главное из них — это Луна, потому что она близко. Следующее по масштабу воздействия — Солнце, потому что оно массивное. Остальные планеты тоже оказывают некоторое влияние на Землю, но оно едва ощутимо.

Для анализа внешнего гравитационного воздействия на Землю планету обычно представляют в виде твердого шара, покрытого жидкой оболочкой (рис. 8.7). Это неплохая модель, поскольку у нашей планеты действительно есть подвижная оболочка в виде океана и ат-

мосферы, а все остальное довольно твердое. Хотя земная кора и внутренние слои имеют ограниченную жесткость и немного поддаются приливному влиянию, их упругой деформацией можно пренебречь при расчетах эффекта, производимого на океан.



**Рис. 8.6.** Планета Земля, вид издалека.

Если в системе центра масс Земли нарисовать векторы приливных сил, то получим вот такую картину: поле приливных сил вытягивает океан вдоль оси «Земля—Луна», а в перпендикулярной ей плоскости прижимает его к центру Земли (рис. 8.8). Таким образом, планета (во всяком случае, ее подвижная оболочка) стремится принять форму эллипсоида. При этом возникают две выпуклости (их называют приливными горбами) на противоположных сторонах земного шара: одна обращена к Луне, другая — от Луны, а в полосе между ними, соответственно, возникает впадина.

Более интересная вещь происходит в промежутке — там, где вектор приливной силы пытается сместить жидкую оболочку вдоль земной поверхности. И это естественно: если в одном месте вы хотите приподнять море, а в другом месте — опустить, то вам надо переместить воду оттуда сюда. И между ними приливные силы перегоняют воду в «подлунную точку» и в «антилунную точку».

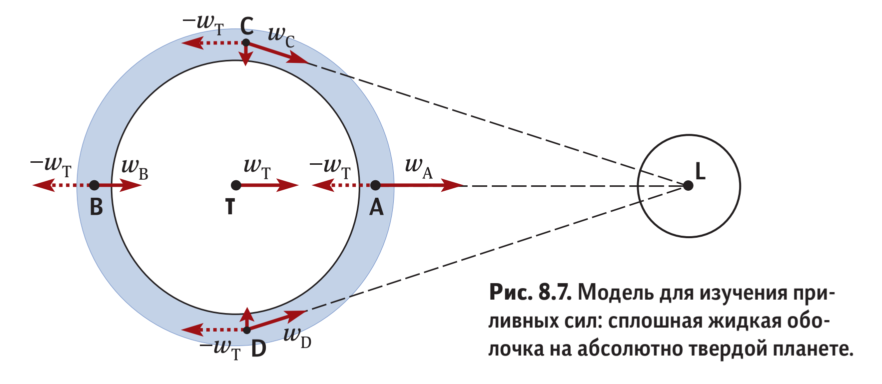



**Рис. 8.7.** Модель для изучения приливных сил: сплошная жидкая оболочка на абсолютно твердой планете.

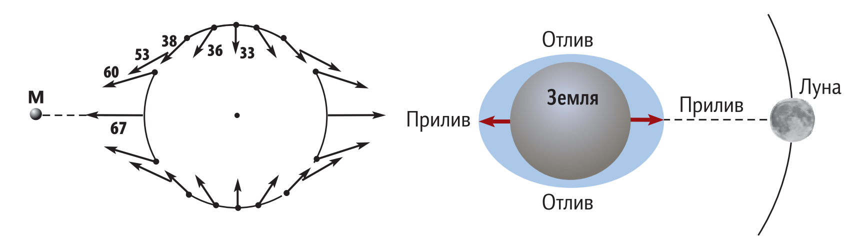



**Рис. 8.8.** ***Слева*** **— приливные силы на поверхности сферы, вызванные влиянием массы М; в разных точках сферы показаны направления векторов силы и указана их абсолютная величина в относительных единицах (из книги Дж. Г. Дарвина «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе», М.: Наука, 1965);** ***справа*** **— деформация океана под гравитационным влиянием Луны.**

Количественно рассчитать приливный эффект очень просто. С одной стороны, гравитация Земли старается сделать океан шарообразным, с другой — приливная часть лунного и солнечного влияния стремится вытянуть его вдоль оси. Если оставить Землю в покое и дать ей возможность свободно падать на Луну, то высота выпуклости достигла бы примерно полуметра, т. е. океан приподнимается над своим средним уровнем всего-то на полметра. Если вы плывете на пароходе по открытому морю или океану, полметра — это неощутимо. Это называют *статическим приливом.*

Но чтобы создать в подлунной точке полуметровую выпуклость, нужно перегнать туда большое количество воды. А ведь поверхность Земли не остается неподвижной, она по отношению к направлению на Луну и на Солнце быстро вращается, делая полный оборот за сутки (а Луна по орбите идет медленно — один оборот вокруг Земли почти за месяц). Поэтому приливный горб постоянно «бегает» по поверхности океана, так что твердая поверхность Земли за сутки два раза оказывается под приливной выпуклостью и два раза — под отливным понижением уровня океана. Прикинем: 40 тысяч километров (длина земного экватора) в сутки — это 500 метров в секунду. Значит, эта полуметровая волна, типа мини-цунами, набегает на восточные побережья континентов в районе экватора со сверхзвуковой скоростью. На наших широтах скорость достигает 250–300 м/с — тоже довольно много: хоть волна и не очень высокая, за счет инерции она может создать большой эффект.

Почти на каждом экзамене мне попадается студент, который уверенно утверждает, что прилив происходит только на одной стороне Земли — на той, которая обращена к Луне. Как правило, такое

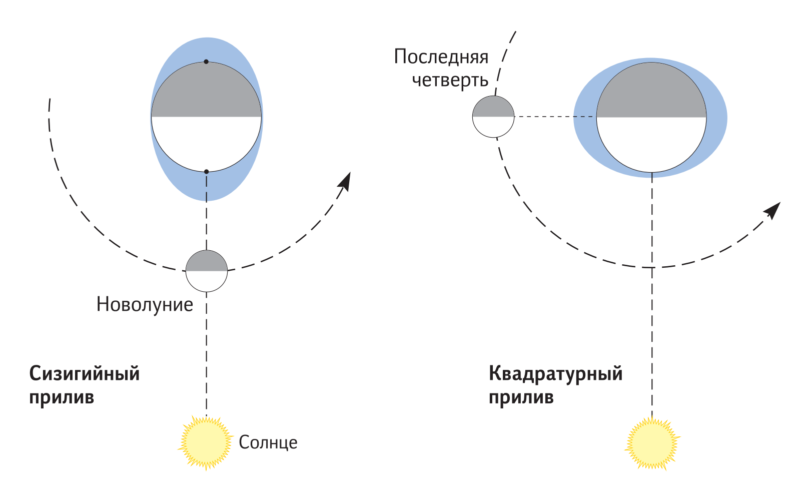



**Рис. 8.9. Высота приливов меняется с периодом в две недели.**

говорит девушка. Но бывает, хотя и реже, что и юноши в этом вопросе заблуждаются. При этом в целом знания астрономии более глубокие у девушек. Любопытно было бы выяснить причину этой «приливно-гендерной» асимметрии.

Второй объект по масштабу влияния на Землю — это Солнце. Оно в 400 раз дальше от нас, чем Луна, но в 27 млн раз массивнее. Поэтому эффекты от Луны и от Солнца получаются сравнимыми по величине, хотя Луна все же действует чуть сильнее: гравитационный приливный эффект от Солнца примерно вполовину слабее, чем от Луны. Иногда их влияние складывается: это происходит в новолуние, когда Луна проходит на фоне Солнца, и в полнолуние — когда Луна находится с противоположной от Солнца стороны. В эти дни — когда Земля, Луна и Солнце выстраиваются в линию, а происходит это каждые две недели — суммарный приливный эффект получается в полтора раза больше, чем только от Луны. А через неделю Луна проходит четверть своей орбиты и оказывается с Солнцем в квадратуре (прямой угол между направлениями на них), и тогда их влияния ослабляют друг друга. В среднем высота приливов в открытом море меняется от 25 до 75 см.

Морякам приливы известны давно. Что делает капитан, когда корабль сел на мель? Если вы читали морские приключенческие романы, то знаете, что он сразу смотрит, в какой фазе Луна, и ждет, когда будет ближайшее полнолуние либо новолуние. Тогда максимальный прилив может поднять корабль и снять его с мели.

### Береговые проблемы и особенности

Приливы особенно важны для портовых работников и для моряков, которые собираются ввести свой корабль в порт либо вывести из порта. Как правило, проблема мелководья возникает вблизи берегов, и чтобы она не мешала движению судов, для входа в бухту прорывают подводные каналы — искусственные фарватеры. Их глубина должна учитывать высоту максимального отлива.

Если мы посмотрим в какой-то момент времени на высоту приливов и проведем на карте линии равной высоты воды (рис. 8.11), то получатся концентрические окружности с центрами в двух точках (в подлунной и антилунной), в которых прилив максимален. Если бы орбитальная плоскость Луны совпадала с плоскостью земного экватора, то эти точки всегда бы перемещались по экватору и за сутки (точнее — за $24^h\ 50^m\ 28^s$) делали бы полный оборот. Однако Луна ходит не в этой плоскости, а близ плоскости эклиптики, по отношению к которой экватор наклонен на 23,4°. Поэтому подлунная точка «гуляет» также и по широте. Таким образом, в одном и том же порту (т. е. на одной и той же широте) высота максимального прилива, происходящего через каждые 12,5 часов, в течение суток меняется в зависимости от ориентации Луны относительно земного экватора.

Эта «мелочь» важна для теории приливов. Посмотрим еще раз: Земля вращается вокруг своей оси, а плоскость лунной орбиты на-

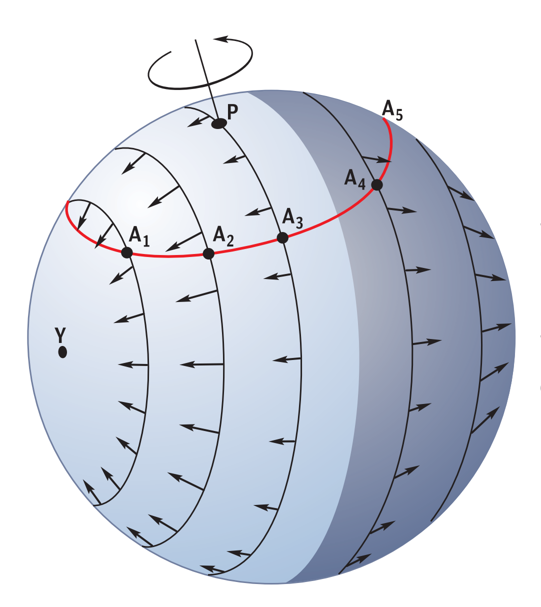



**Рис. 8.10.** Из-за вращения Земли точка A подвергается периодически меняющимся приливным силам. Стрелками показана горизонтальная проекция приливообразующей силы. Из книги Дж. Г. Дарвина «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе», М.: Наука, 1965.

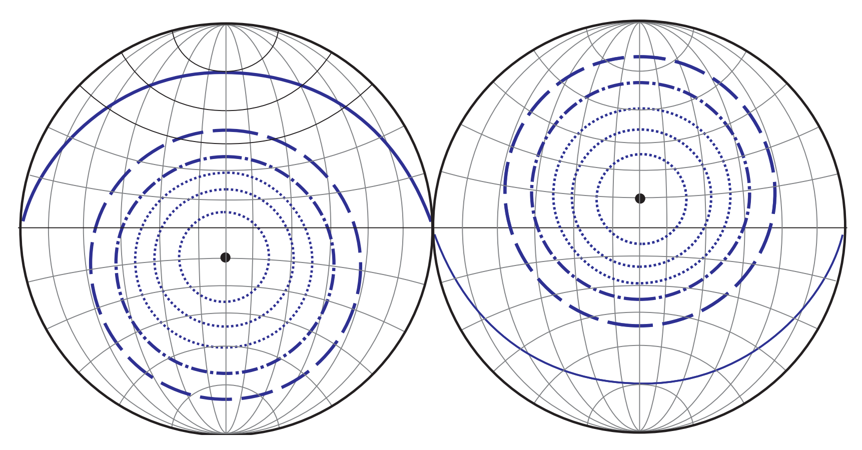


**Рис. 8.11.** **Изолинии статического прилива, когда Луна находится в зените на широте 15°. Из книги Дж. Г. Дарвина «Приливы и родственные им явления в Солнечной системе», М.: Наука, 1965.**

клонена к ней. Поэтому каждый морской порт в течение суток «обегает» вокруг полюса Земли, один раз попадая в область максимально высокого прилива, а через 12,5 часов — опять в область прилива, но менее высокого, т. е. два прилива в течение суток не равноценны по высоте. Один всегда больше другого, потому что плоскость лунной орбиты не лежит в плоскости земного экватора.

Для жителей побережья этот эффект жизненно важен. Например, во Франции есть интересный остров, который соединен с материком асфальтовой дорогой, проложенной по дну пролива. На острове живет много людей, но они не могут пользоваться этой дорогой, пока уровень моря высокий (рис. 8.12). По этой дороге можно проехать только два раза в сутки. Люди подъезжают и ждут отлива, когда уровень воды понизится и дорога станет доступной. Жители ездят на побережье на работу и с работы, пользуясь специальной таблицей приливов, которая публикуется для каждого населенного пункта побережья. Если не учитывать это явление, вода по пути может захлестнуть автомобиль. Туристы просто приезжают туда и гуляют, чтобы посмотреть на дно моря, когда нет воды (рис. 8.13), а местные жители что-то при этом собирают со дна, иногда даже для пропитания, т. е. по сути этот эффект кормит людей.

Жизнь вышла из океана благодаря именно приливам и отливам. Некоторые прибрежные животные в результате отлива оказывались на песке и вынуждены были научиться дышать кислородом непо-




**Рис. 8.12.** Подводная дорога с острова Нуармутье на материк во время прилива и отлива. Фото В. Г. Сурдина.

средственно из атмосферы. Если бы не было Луны, то жизнь, может быть, не так активно выходила бы из океана, потому что там во всех отношениях хорошо — термостатированная среда, невесомость. Но если ты вдруг попал на берег, то надо как-то выживать.

Побережье, особенно если оно плоское, во время отлива сильно обнажается, и на некоторое время люди теряют возможность пользоваться своими плавсредствами, беспомощно лежащими, как киты, на берегу. Но в этом есть кое-что полезное, потому что период отлива можно использовать для ремонта судов, особенно в какой-нибудь бухточке. Например, есть залив Фанди на восточном побережье Канады, в котором, говорят, самые высокие в мире приливы: перепад уровня воды может доходить до 16 метров, что считается рекордом для морского прилива на Земле. Моряки к этому свойству приспособились: во время прилива они подводят судно к берегу, укрепляют его, а когда вода уходит, судно повисает, и ему можно подконопатить дно.

Люди издавна стали следить и регулярно записывать моменты и характеристики высоких приливов, чтобы научиться прогнози-



**Рис. 8.13.** Дорога с острова Нуармутье во время отлива. Фото В. Г. Сурдина.

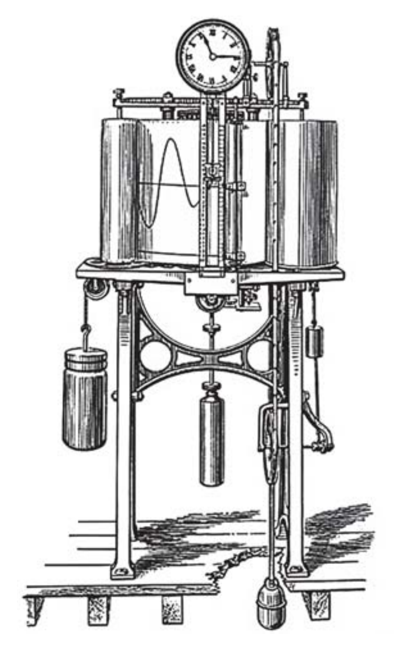



**Рис. 8.14.** Морские приливы в узких заливах значительно выше, чем в открытом море. Прилив и отлив в канадском заливе Фанди.

ровать это явление. Вскоре изобрели *мареограф* — прибор, в котором поплавок ходит вверх-вниз в зависимости от уровня моря, а показания автоматически вычерчиваются на бумаге в виде графика (рис. 8.16). Кстати, средства измерения почти не изменились с момента первых наблюдений и до наших дней.



**Рис. 8.15.** Лодки во французской бухте во время отлива.



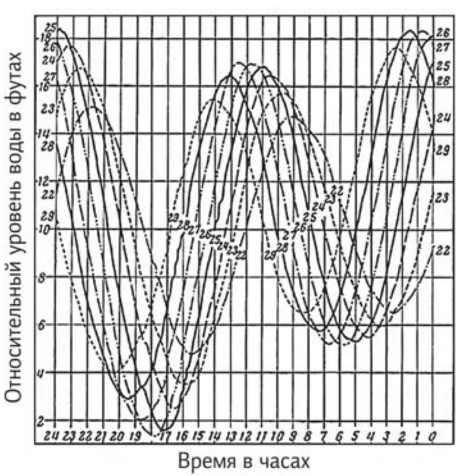



**Рис. 8.16.** Эскиз мареографа Леже и нарисованная им кривая уровня моря в порту Бомбея от полудня 22 апреля до полудня 30 апреля 1884 г.

На основе большого количества записей гидрографов математики стараются создать теорию приливов. Если имеется многолетняя запись периодического процесса, его можно разложить на элементарные гармоники — синусоиды разной амплитуды с кратными периодами (рис. 8.17) и потом, определив параметры гармоник, продлить суммарную кривую в будущее и на этой основе составить таблицы приливов. Сейчас такие таблицы опубликованы для каждого порта на Земле, и любой капитан, собирающийся войти в конкретный порт, берет для него таблицу и смотрит, когда там будет достаточный для его корабля уровень воды.

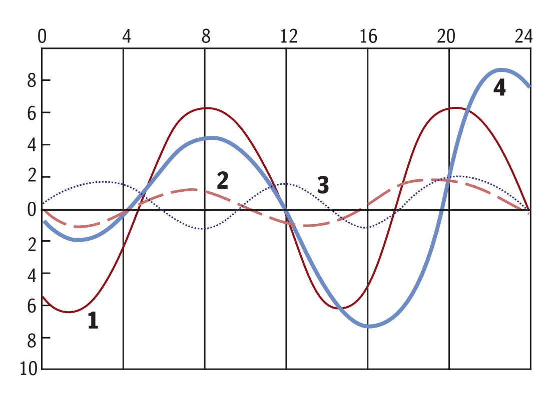



**Рис. 8.17.** Пример гармонического анализа колебаний уровня моря, в котором временная кривая 4 разложена на три компонента, обусловленные тремя факторами: 1 — лунный прилив; 2 — солнечный прилив; 3 — собственный период колебаний.

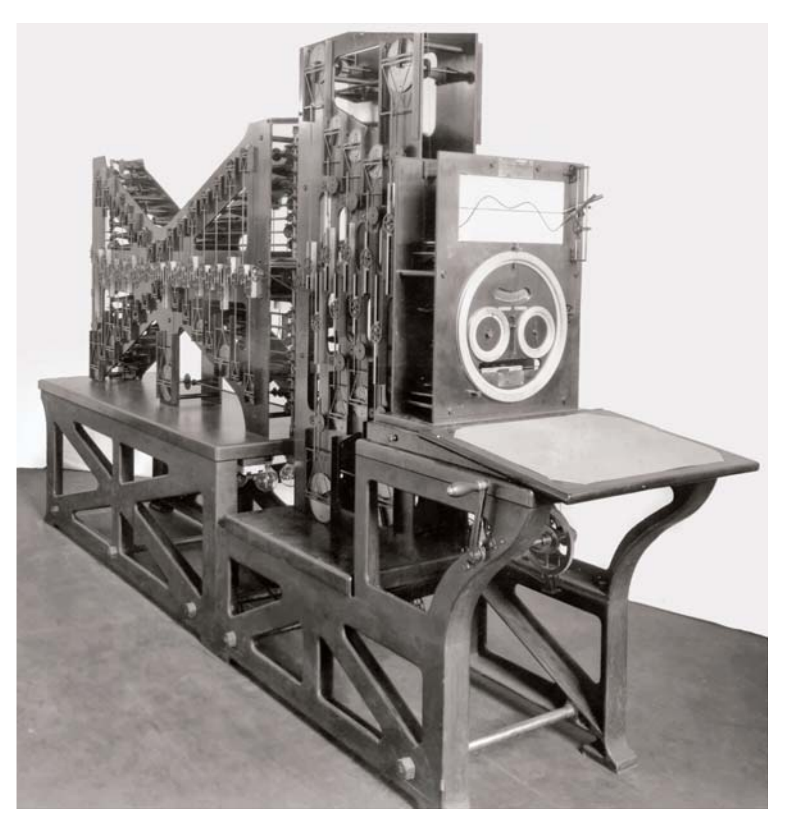


**Рис. 8.18.** **Механическая вычислительная машина для прогноза приливных колебаний уровня моря. Она работала на основе Фурье-анализа многолетних записей уровня воды, имитируя гармонические члены временнóго ряда вращением барабанов.**

Самая известная история, связанная с прогностическими расчетами, произошла во Вторую мировую войну. В 1944 г., когда наши союзники, англичане и американцы, собирались открыть второй фронт против гитлеровской Германии, им нужно было высадиться на французском побережье. Северное побережье Франции очень неудобно для высадки: берег обрывистый, высотой 25–30 метров, а глубина океана невелика, так что корабли могут подойти к берегу только в моменты максимальных приливов. Если бы они сели на мель, их бы просто расстреляли из пушек. Чтобы этого избежать, была создана специальная механическая (электронных тогда еще не было) вычислительная машина (рис. 8.18, 8.19). Она использовала Фурье-анализ временны́х рядов морского уровня с помощью

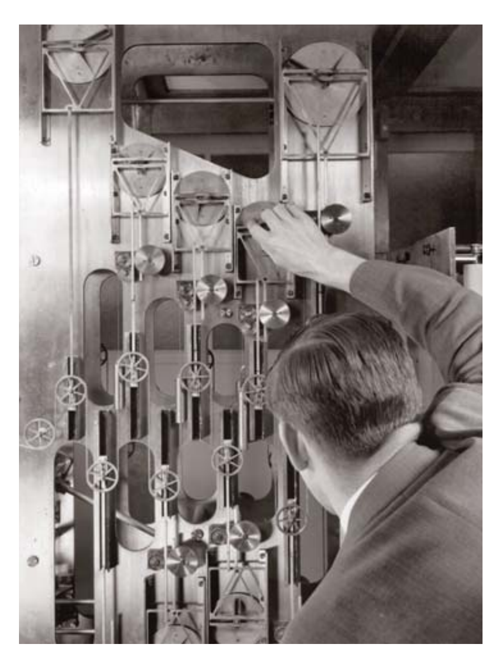


**Рис. 8.19.** Установка параметров на вычислительной машине.

вращающихся с различной скоростью барабанов, через которые проходил металлический трос, суммирующий все члены ряда Фурье, а связанное с тросом перышко выписывало будущую высоту прилива в зависимости от времени. Это была совершенно секретная работа, которая сильно продвинула теорию приливов, потому что оказалось возможным с достаточной точностью предсказать момент наиболее высокого прилива, благодаря чему тяжелые военные транспортные корабли прошли Ла-Манш и высадили десант на побережье. Так математики и геофизики сохранили жизнь многим людям.

Некоторые математики стараются обобщить данные в масштабе всей планеты, стремясь создать единую теорию приливов, но сравнивать записи, сделанные в разных местах, трудно, потому что Земля очень неправильная. Это лишь в нулевом приближении единый океан покрывает всю поверхность планеты, а на самом деле есть материки и несколько слабо связанных между собой океанов, причем у каждого океана своя частота собственных колебаний.

Предыдущие рассуждения о колебаниях уровня моря под действием Луны и Солнца касались открытых океанских просторов, где приливное ускорение очень сильно меняется от одного берега к другому. А в локальных водоемах — например, в озерах — может ли прилив создать заметный эффект? Казалось бы, этого не должно быть, ведь во всех точках озера приливное ускорение примерно одинаково, разница маленькая. Например, в центре Европы есть Женевское озеро, оно всего около 70 км в длину и никак не связано с океанами, но люди давно заметили, что там происходят существенные суточные колебания воды. Почему они возникают?

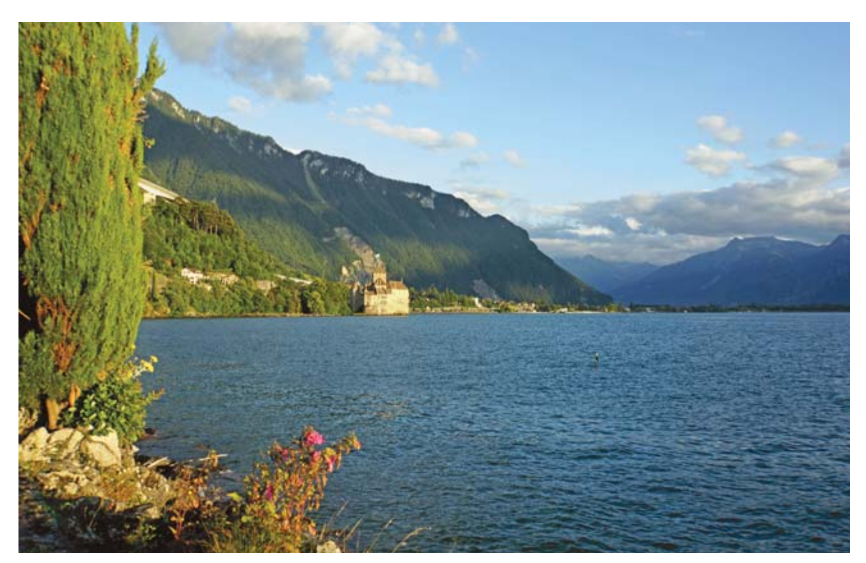


**Рис. 8.20.** **Восточный берег Женевского озера у г. Монтрё (Швейцария).**

Да, приливная сила чрезвычайно мала. Но главное — она регулярна, т. е. действует периодически. Все физики знают эффект, который при периодическом действии силы иногда вызывает увеличенную амплитуду колебаний. Например, в столовой вы берете на раздаче тарелку супа и спокойно идете к своему столу, но вдруг суп начинает из тарелки выпрыгивать: это значит, что частота ваших шагов попала в резонанс с собственными колебаниями жидкости в тарелке. Заметив это, мы резко меняем темп ходьбы — и суп «успокаивается». Своя базовая резонансная частота есть у каждого водоема. И чем больше размер водоема, тем ниже частота собственных колебаний жидкости в нем. Так вот, у Женевского озера собственная резонансная частота оказалось кратной частоте приливной силы, и малое приливное влияние «разбалтывает» это озеро так, что на его берегах уровень меняется вполне ощутимо. Эти стоячие волны большого периода, возникающие в замкнутых водоемах, называются *сейшами*.

### Энергия приливов

В наше время один из альтернативных источников энергии пытаются связать с приливным эффектом. Как я уже говорил, главный эффект приливов не в том, что вода поднимается и опускается. Главный эффект — это приливное течение, которое за сутки перегоняет воду вокруг всей планеты.

В неглубоких местах этот эффект очень важен. В районе Новой Зеландии через некоторые проливы капитаны даже не рискуют проводить корабли. Парусникам там вообще никогда не удавалось пройти, да и современные корабли проходят с трудом, потому что дно мелкое и приливные течения имеют колоссальную скорость.

Но раз вода течет, эту кинетическую энергию можно использовать. И уже построены электростанции (рис. 8.21–8.24), на которых турбины вращаются туда-сюда за счет приливного и отливного течения. Они вполне работоспособны. Первая приливная электростанция (ПЭС) мощностью 240 МВт была построена во Франции, она до недавних пор была самой крупной в мире. По сравнению с ГЭС — не ахти, конечно, но ближайшие сельские районы она обслуживает.

Чем ближе к полюсу, тем меньше скорость приливной волны, поэтому в России побережий, у которых были бы очень мощные приливы, нет. У нас вообще выходов к морю немного, а побережье Северного Ледовитого океана для использования приливной энергии не особенно выгодно еще и потому, что прилив гонит воду с востока на запад. Но все-таки подходящие для ПЭС места есть, например губа Кислая (рис. 8.24). Дело в том, что в заливах прилив создает всегда больший эффект: волна набегает, устремляется в залив, а он сужается — и амплитуда нарастает. Похожий процесс происходит, если щелкнуть кнутом: сначала длинная волна медленно

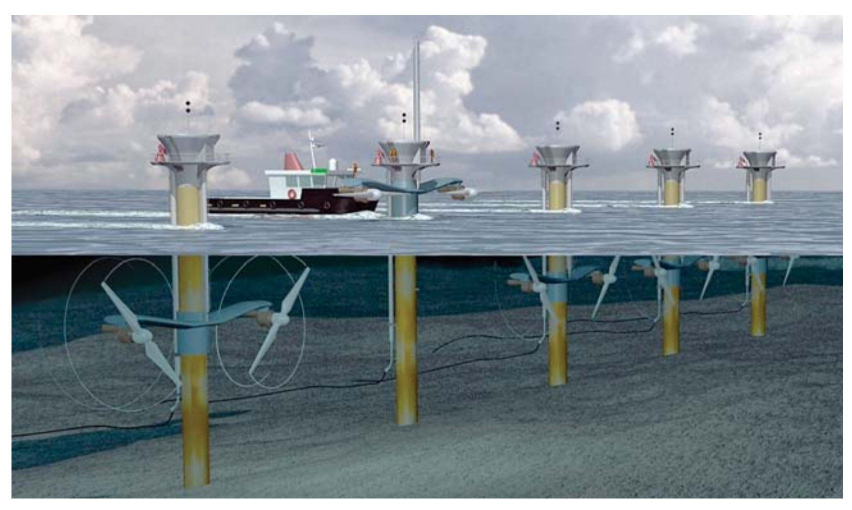


**Рис. 8.21.** **Проект электростанции в неглубоком проливе, использующей энергию приливного течения.**

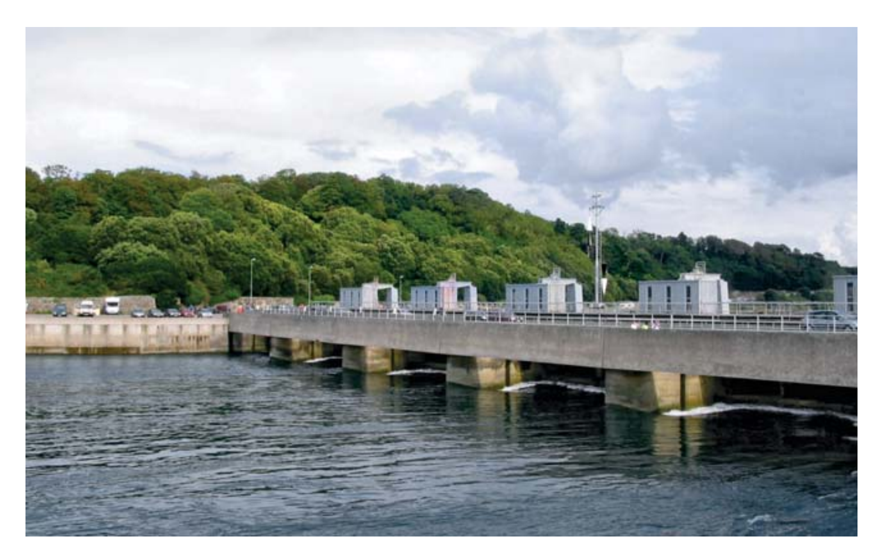


**Рис. 8.22.** Приливная электростанция «Ля Ранс» в устье реки Ранс вблизи города Сен-Мало (Бретань, Франция).

идет по кнуту, но потом масса вовлеченной в движение части кнута уменьшается, поэтому скорость увеличивается ($mv$ сохраняется!) и, подходя к узкому концу, достигает сверхзвуковой, в результате чего мы слышим щелчок.

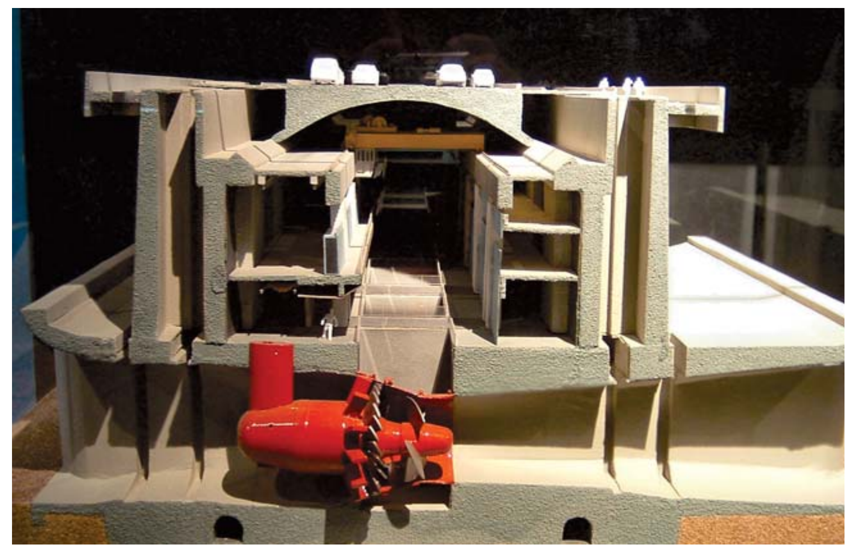


**Рис. 8.23.** Макет турбинного зала электростанции «Ля Ранс».






**Рис. 8.24.** Кислогубская ПЭС — единственная в России приливная электростанция. Расположена в 27 км от Мурманска, в губе Кислая Баренцева моря, где высота приливов достигает 5 м. Станция состоит из двух частей: старой, 1968 г., с французским гидроагрегатом мощностью 0,2 МВт, и новой, 2006 г., с отечественным агрегатом на 1,5 МВт. Находится на государственном учете как памятник науки и техники.

Создавая экспериментальную Кислогубскую ПЭС небольшой мощности, энергетики пытались понять, насколько эффективно можно использовать приливы на околополярных широтах для производства электроэнергии. Особого экономического смысла она не имеет. Однако сейчас есть проект очень мощной российской ПЭС (Мезенской) — на 8 гигаватт. Чтобы достичь этой колоссальной мощности, нужно перегородить большой залив, отделив Белое море от Баренцева. Правда, весьма сомнительно, что это будет сделано, пока у нас есть нефть и газ.

### Прошлое и будущее приливов

Кстати говоря, из чего черпается энергия приливов? Турбина крутится, электроэнергия вырабатывается, а какой объект теряет при этом энергию?

Поскольку источником энергии прилива служит вращение Земли, а мы черпаем из него, значит, вращение должно замедляться. Казалось бы, у Земли есть внутренние источники энергии (тепло из недр идет благодаря геохимическим процессам и распаду радиоактивных элементов), есть чем компенсировать потери кинетической энергии. Это так, но энергетический поток, распространяясь в среднем практически равномерно по всем направлениям, едва ли может существенно повлиять на момент импульса и изменить вращение.

Если бы Земля не вращалась, приливные горбы смотрели бы точно в направлении Луны и ему противоположном. Но, вращаясь, тело Земли сносит их вперед по направлению своего вращения (рис. 8.25) — и возникает постоянное расхождение приливного пика и подлунной точки в 3–4°. К чему это приводит? Горб, который ближе к Луне, притягивается к ней сильнее. Эта сила притяжения стремится затормозить вращение Земли. А противоположный горб дальше от Луны, он старается ускорить вращение, но притягивается слабее, поэтому равнодействующий момент сил оказывает на вращение Земли тормозящее действие.

Итак, наша планета все время уменьшает скорость своего вращения (правда, не совсем регулярно, скачками, что связано с особенностями массопереноса в океанах и атмосфере). А какое влияние оказывают земные приливы на Луну? Ближняя приливная выпуклость тянет Луну за собой, дальняя — напротив, замедляет. Первая сила больше, в результате Луна ускоряется. Теперь вспомните из лекции № 3, что происходит со спутником, который принудительно тянут вперед по движению. Поскольку его энергия увеличивает-

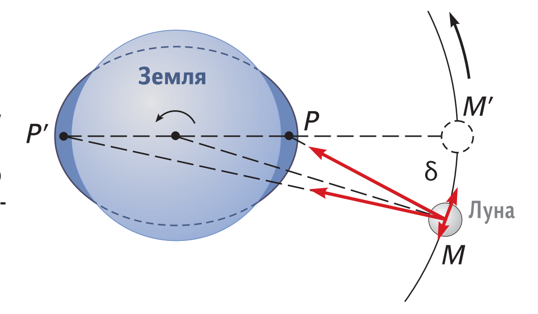



**Рис. 8.25.** Сила вязкого трения и инерция тянут приливную волну в направлении вращения Земли (т. е. на восток), в результате чего она приходит чуть позже момента кульминации Луны.

ся, он отдаляется от планеты, а его угловая скорость при этом падает, потому что растет радиус орбиты. Кстати, увеличение периода обращения Луны вокруг Земли было замечено еще во времена Ньютона.

Если говорить о цифрах, то Луна отдаляется от нас примерно на 3,8 см в год, а длительность земных суток каждые сто лет возрастает на сотую долю секунды. Вроде бы ерунда, но вспомните, что Земля существует миллиарды лет. Легко подсчитать, что во времена динозавров в сутках было около 18 часов (нынешних часов, разумеется).

Поскольку Луна отдаляется, приливные силы становятся меньше. Но ведь она удалялась всегда, и если мы обратим взгляд в прошлое, то увидим, что раньше Луна была ближе к Земле, а значит, и приливы были выше. Можете оценить, например, что в архейскую эру, 3 млрд лет назад, приливы были километровой высоты.

### Приливы и земная ось

О том, что Земля замедляет свое вращение, вы уже знаете. А ось вращения Земли как-нибудь реагирует на приливное воздействие со стороны Луны и Солнца? До некоторых пор люди думали, что ось вращения Земли прочно «прибита» к небу: один полюс под Полярной звездой, другой — под соответствующей южной звездой, и такое положение дел сохраняется на протяжении всей эволюции планеты. Но это оказалось не так: ориентация земной оси меняется под действием приливного эффекта.

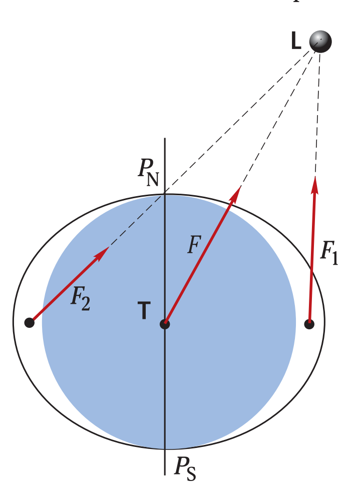
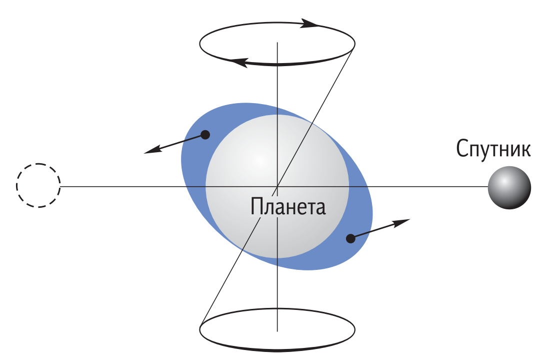



**Рис. 8.26. Причина прецессии оси вращения планеты T — в асимметрии сил, действующих со стороны небесного тела L на экваториальное «вздутие» планеты.**

Почему влияние планет вызывает изменение ориентации оси вращения? Дело в том, что Земля — не шар, а эллипсоид. Но это не из-за приливной деформации Земли, величина которой составляет всего полметра. Земля стала эллипсоидом потому, что она быстро крутится и ее растянула центробежная сила: поперек экватора наша планета на 20 км толще, чем вдоль полярной оси. Землю можно представить как некий симметричный шар, на который наложен экваториальный «пояс» или «обруч» — утолщение вдоль экватора, в котором сосредоточен избыток мас-

**Рис. 8.27.** **Момент приливных сил, действующих на экваториальное вздутие вращающейся планеты, сохраняет свое направление при любом положении спутника на орбите.**




сы. Ближняя его часть сильнее притягивается к Луне, если Луна не в полюсе (а она там никогда не бывает), дальняя — слабее. Эти силы разной величины в разных направлениях относительно центра масс действуют на вращающуюся Землю, и их разница старается так повернуть Землю, чтобы поставить ось ее вращения перпендикулярно лунной орбите. Конечно, это не удается: Луна слабовата. Однако она обходит Землю по кругу, поэтому к большому моменту импульса добавляется небольшой, действующий в поперечном направлении. Это заставляет ось вращения Земли понемногу прецессировать: земная ось «ходит» по конусу, но угол ее наклона к плоскости орбиты не меняется (рис. 8.28). То же самое происходит у знакомого всем волчка, если его раскрутить: сила тяжести старается опрокинуть его на пол, т. е. положить ось вращения горизонтально, а момент этой силы направлен перпендикулярно оси и перпендикулярно моменту импульса (который всегда направлен вдоль оси вращения). Из-за постоянно действующего поперечного момента сил происходит изменение направления вектора момента импульса (при сохранении его модуля), в результате ось волчка ходит по конусу.

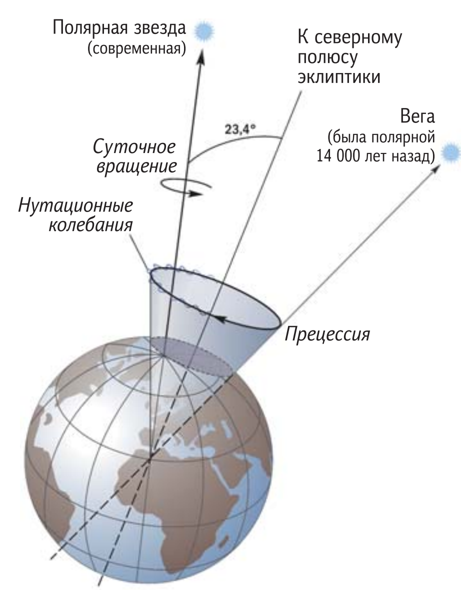



**Рис. 8.28.** **Прецессия земной оси с мелкими нутационными колебаниями.**

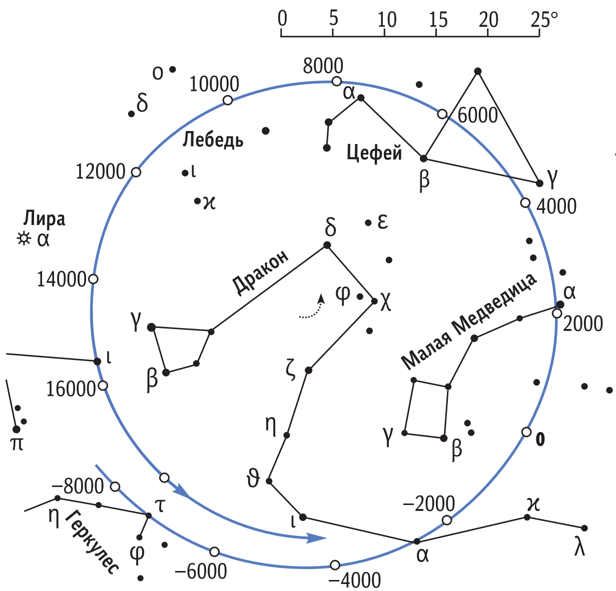



**Рис. 8.29.** Прецессия Северного полюса мира вокруг оси эклиптики, перпендикулярной орбитальной плоскости Земли. Пунктирная стрелка в центре показывает перемещение полюса эклиптики.

Обратите внимание: прецессия волчка происходит в ту же сторону, куда он вращается, а у Земли — наоборот, в противоположную. Почему? Гравитация старается положить волчок плашмя, а момент сил, действующих со стороны Луны, старается поставить ось вращения перпендикулярно плоскости орбиты, т. е. моменты сил действуют в разных направлениях.

Как проявляется прецессия оси вращения на Земле? Очень просто — полюсы нашего мира «гуляют» по небу с периодом около 26 тыс.

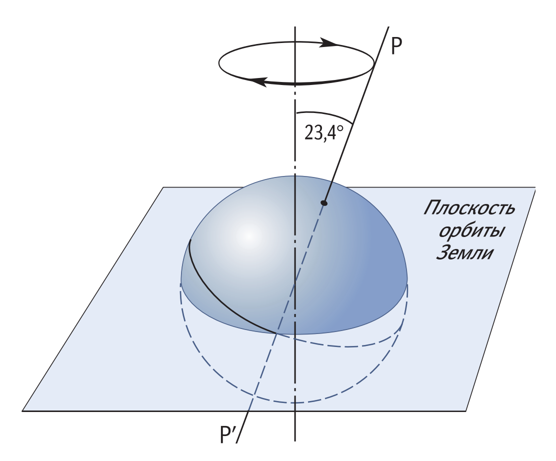



**Рис. 8.30.** Период общей прецессии земной оси составляет 25 770 лет. Луна и Солнце сдвигают точку весеннего равноденствия к западу: Луна — на 34,5″/год, Солнце — на 15,9″/год. Влияние планет, приводящее к наклону эклиптики, уменьшает величину общей прецессии на 0,105″.

лет. Мы с вами этого не замечаем: когда мы были маленькими, нам сказали, что Полярная звезда (Альфа созвездия Малой Медведицы) всегда на севере, и мы в этом убеждаемся. Наши дети тоже будут думать, что ось Земли смотрит на эту звезду, но уже прапрапраправнуки обнаружат, что нет — чуть в сторону. Дальше она будет продолжать гулять и через 14 тыс. лет окажется рядом с Альфой Лиры, известной всем звездой под названием Вега. И для тех, кто будет жить на Земле через 14 тыс. лет, полярной звездой будет служить очень яркая голубоватая Вега. Потом ось продолжит свое движение и через 26 тыс. лет вернется к нынешней невзрачной Полярной звезде (рис. 8.28, 8.29).

Это процесс интересен для историков, которые реконструируют события прошлого. В частности, обсуждался вопрос, как строителям пирамид Египта удавалось их ориентировать четыре тысячелетия назад. Но с того времени земная ось на фоне 26 тысяч лет описала заметную дугу, и нужно учитывать, что во времена древних египтян обозреваемое с той же точки Земли звездное небо было совсем не таким, как сегодня: небесный свод был повернут по-другому, и стороны света смотрели на другие созвездия.

Если внимательно посмотреть на кривую, выписываемую на небе земной осью, то мы увидим, что на нее наложен мелкий тремор (рис. 8.28, 8.31): двигаясь по конусу, ось Земли немного покачивается. Это называется нутационным движением. Оно связано с тем, что под приливным влиянием Солнца плоскость лунной орбиты «гуляет» относительно плоскости эклиптики, вектор действующего на Землю момента сил слегка меняется и ось Земли из-за этого покачивается.

Время от времени в журналистских публикациях проскакивает «сенсация»: какое-то землетрясение или цунами где-нибудь в Японии привело к тому, что сдвинулась земная ось. Как правило, это невероятное вранье. Однако такой эффект — сдвиг оси вращения относительно поверхности планеты — реально су-

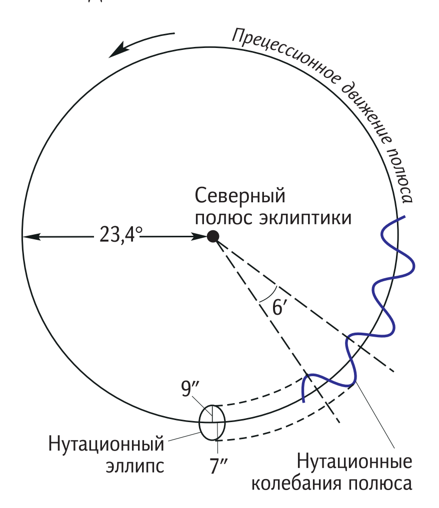



**Рис. 8.31.** **Сложное движение земной оси можно представить как сумму прецессии и нутации.**

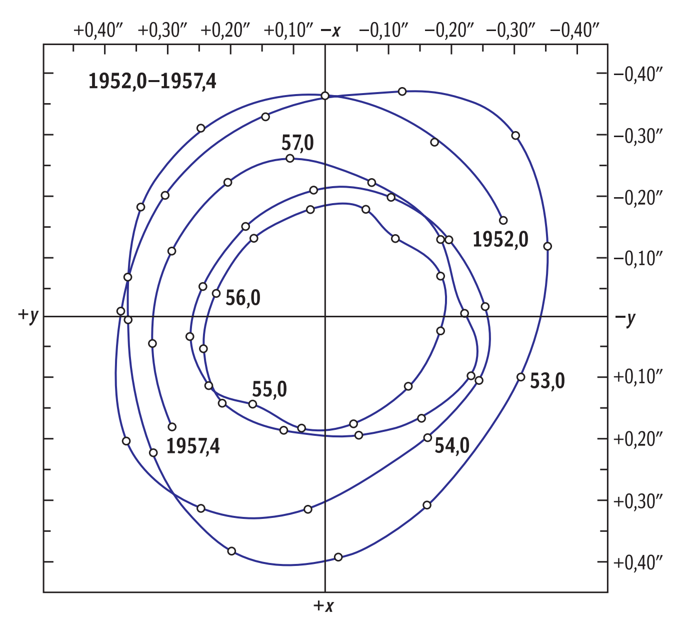



**Рис. 8.32.** **Движение северного географического полюса по поверхности Земли в 1952–1957 гг. Сторона квадрата — 28 м.**

ществует. До сих пор мы говорили о поворотах оси вращения относительно небесных тел, а это возможно, только если есть внешний источник момента сил. Но даже если вокруг ничего нет и ось строго соблюдает свою ориентацию в пространстве, в теле Земли эта ось может колыхаться из-за неравномерного распределения массы и течения вещества внутри планеты. Это простой механический эффект, называемый *свободными колебаниями тела на оси вращения*, и в случае Земли он очень слаб. Координаты истинного географического северного полюса — точки, где в Северном Ледовитом океане ось вращения Земли пробивает ледяной купол и выходит в небо, — постоянно меняются: полюс «нарезает круги» около средней точки на расстоянии порядка 10 метров (рис. 8.32).

### Приливные явления на других планетах

Разумеется, в системах других планет со спутниками происходят такие же явления. Юпитер, например, — очень массивная планета, у которой большое число спутников (на 2017 г. их известно 79). Четыре его крупнейших спутника (их называют галилеевыми, потому что Галилей их обнаружил) подвергаются влиянию со стороны Юпитера вполне ощутимо. Ближайший из них, Ио, весь покрыт вулканами, среди которых более полусотни действующих, причем они выбрасывают

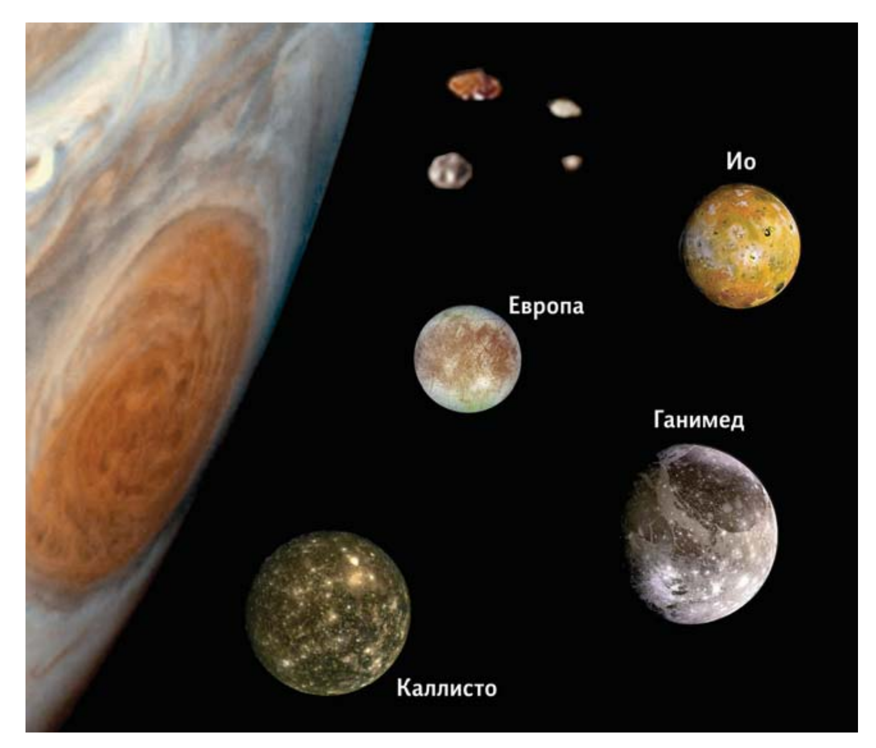
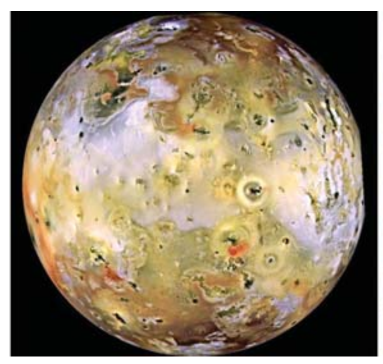



**Рис. 8.33.** Юпитер и его крупнейшие спутники. Коллаж из фотографий NASA.

«лишнее» вещество на 250–300 км вверх. Это открытие было весьма неожиданным: на Земле таких мощных вулканов нет, а тут маленькое тело размером с Луну, которое должно было бы остыть уже давно, а вместо этого оно пышет жаром со всех сторон (рис. 8.34). Где источник этой энергии?

Вулканическая активность Ио была сюрпризом не для всех: за полгода до того, как первый зонд подлетел к Юпитеру, два американских геофизика опубликовали работу, в которой они рассчитали приливное влияние Юпитера на этот спутник. Оно оказалось настолько велико, что способно деформировать тело спутника. А при деформации всегда выделяется тепло. Когда мы берем кусок холодного пластилина и начинаем мять его в руках, он становится после нескольких сжатий мягким, податливым. Это происходит не потому, что рука нагрела его своим теплом (точно так же получится, если его плющить в холодных тисках), а потому, что деформация вложила в него механическую энергию, которая преобразовалась в тепловую.



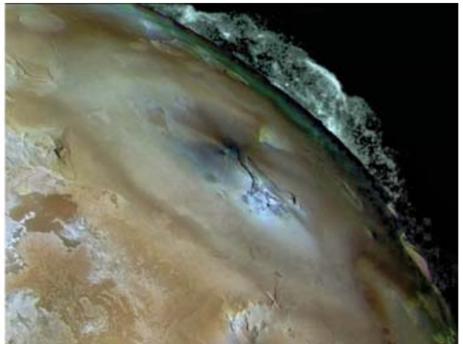


**Рис. 8.34.** Ио, спутник Юпитера, характеризуется обилием активных вулканов. Справа: на заднем плане происходит извержение. Фото: NASA.

Но почему форма спутника меняется под действием приливов со стороны Юпитера? Казалось бы, стал один раз эллипсоидом, двигаясь по круговой орбите и синхронно вращаясь, как наша Луна, — и нет повода для последующих искажений формы. Однако рядом с Ио есть и другие спутники, и все они заставляют ее орбиту немного смещаться туда-сюда: Ио то приближается к Юпитеру, то удаляется. Значит, приливное влияние то ослабевает, то усиливается, и форма тела все время меняется.

Раньше мы не упоминали о приливах в твердом теле Земли, но они, конечно, тоже есть, правда, не очень высокие — порядка 10 см. Если вы посидите часов шесть на своих местах, то благодаря приливам сантиметров на двадцать «погуляете» относительно центра Земли. Это колебание для человека, конечно, неощутимо, но геофизические приборы его регистрируют.

**Рис. 8.35.** Европа, спутник Юпитера: общий вид и трещины в ледяной коре. Фото: NASA.



**Рис. 8.36.** Ледяные торосы на Европе.

В отличие от земной тверди, поверхность Ио за каждый орбитальный период колеблется с многокилометровой амплитудой. Большая энергия деформации рассеивается в виде тепла и нагревает недра. На поверхности, кстати, не видно метеоритных кратеров, потому что вулканы постоянно забрасывают всю поверхность свежим веществом. Стоит ударному кратеру образоваться, как лет через сто его засыпают продукты извержения соседних вулканов. Работают они непрерывно и очень мощно, к этому добавляются разломы в коре планеты, через которые из недр вытекает разное вещество, в основном сера. При высокой температуре она темнеет, поэтому струя из кратера выглядит черной. А светлый ободок вулкана — остывшее вещество, которое опадает вокруг. На нашей планете выброшенное из вулкана вещество обычно тормозится воздухом и падает близко к жерлу, образуя конус, а на Ио атмосферы нет, и оно летит по баллистической траектории далеко во все стороны. Пожалуй, это пример самого мощного приливного эффекта в Солнечной системе.

Второй спутник Юпитера, Европа, весь выглядит как наша Антарктида: он покрыт сплошной ледяной коркой, кое-где потрескавшейся (рис. 8.35, 8.36), так как ее тоже что-то постоянно деформирует. Поскольку этот спутник подальше от Юпитера, приливный эффект здесь не так силен, но тоже вполне ощутим. Под этой ледяной корой — жидкий океан: на отдельных снимках видно, как из некоторых разошедшихся трещин бьют фонтаны. Под действием приливных сил океан бурлит, а на его поверхности плавают и сталкиваются ледяные поля, почти как у нас в Северном Ледовитом океане и у берегов Антаркти-

ды. Измеренная электропроводность жидкости океана Европы свидетельствует о том, что это соленая вода. Почему бы там не быть жизни? Заманчиво было бы опустить в одну из трещин прибор и посмотреть, кто там живет.

На самом деле не для всех планет концы с концами сходятся. Например, у Энцелада, спутника Сатурна, тоже есть ледяная кора и океан под ней. Но расчеты показывают, что энергии приливов недостаточно, чтобы поддерживать подледный океан в жидком состоянии. Конечно, кроме приливов у любого небесного тела есть и другие источники энергии — например, распад радиоактивных элементов (урана, тория, калия), но на малых планетах они едва ли могут играть значимую роль. Значит, чего-то мы пока не понимаем.

Приливный эффект чрезвычайно важен для звезд. Почему — об этом в следующей лекции.



# 9 Приливы в мире звезд и галактик

## Как образуется двойная звезда

Приливный эффект является универсальным и работает всегда, когда есть два влияющих друг на друга объекта. Естественно, действует он не только в Солнечной системе, но и за ее пределами, в мире звезд и галактик. Для звезд этот эффект чрезвычайно важен, а иногда оказывается фатальным.

Что происходит при сближении в пространстве двух звезд? Простая небесная механика говорит нам, что когда к более массивному телу из бесконечности подлетает звезда, то она огибает это тело и со скоростью больше второй космической по гиперболе уходит в бесконечность. Если бы звезды были абсолютно жесткими шариками, то они действительно пролетали бы одна мимо другой и навсегда расставались (рис. 9.1, а). Согласно законам небесной механики, сближение двух жестких шарообразных тел не должно приводить к образованию гравитационно связанной системы. Но в жизни так не бывает.

Сближаясь, звезды начинают деформироваться: менее массивная вытягивается в эллипсоид, большая ось которого сначала направлена на центр гравитации, но по мере набора скорости эллипсоид из-за инерции не успевает разворачиваться. Ближняя часть эллипсоида притягивается сильнее и тормозит его — в предыдущей лекции мы рассматривали такой же эффект, в результате которого Луна замедляет вращение Земли. Из-за потери кинетической энергии легкое тело с гиперболической траектории переходит на эллиптическую орбиту. На втором проходе размер орбиты уменьшается, на третьем становится еще меньше, а после нескольких оборотов вокруг своего партнера тело выходит на практически круговую орбиту (рис. 9.1, б). Это типичный результат взаимодействия двух звезд. А куда делась энергия движения этих тел? На бесконечности у малого тела была положительная энергия, теперь же оно попало на свя-

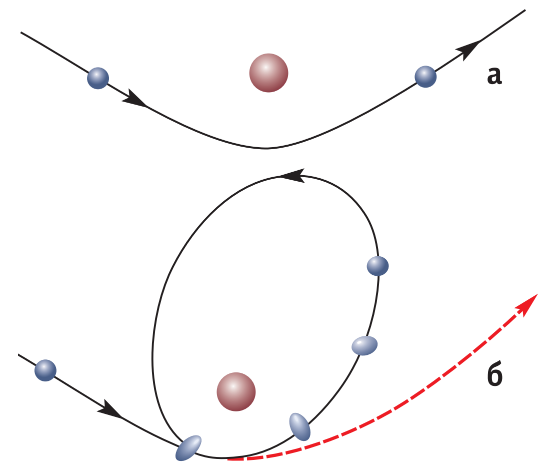



**Рис. 9.1.** Формирование двойной системы в результате приливного захвата: к массивной звезде подлетает маленькое мягкое тело, прилив его растягивает и тормозит, в результате чего оно становится спутником звезды. Второе, более массивное, тело для простоты нарисовано здесь жестким. На самом деле, разумеется, деформируется и оно, отчего эффект лишь усиливается.

занную орбиту, значит, полная энергия стала отрицательной. Кто же «съел» разницу?

Во-первых, происходит деформация, в ходе которой звезда нагревается. Иногда эффект бывает настолько большим, что от избыточного тепла она разбухает, но потом рассеивает энергию в виде излучения и остывает до исходной температуры. Это хорошо демонстрирует численная модель тесного сближения двух звезд. Момент импульса, в отличие от энергии, в этой консервативной системе, естественно, сохраняется и никуда не рассеивается. Массивное тело поглощает часть орбитального момента импульса маленького тела и сильнее раскручивается. Значит, какая-то часть кинетической энергии малого тела потратилась на увеличение скорости осевого вращения большого тела и своей собственной.

Такой же захват вполне может происходить — и в действительности происходит — при взаимодействии двух планет или двух галактик, и тогда эти объекты будут длительное время кружить вокруг общего центра масс.

### Последствия неравноправного партнерства

Когда мы говорили о задаче трех тел (глава 3, раздел «Небесная троица»), в которой одно тело легкое, а другие два массивные, я рассказывал про полости Роша, ограничивающие области гравитационного контроля массивных тел (рис. 9.2). При их взаимодействии нередко возникает ситуация, когда одно из тел заполняет свою полость Роша, прижимая к ее границе свою поверхность. В точке со-

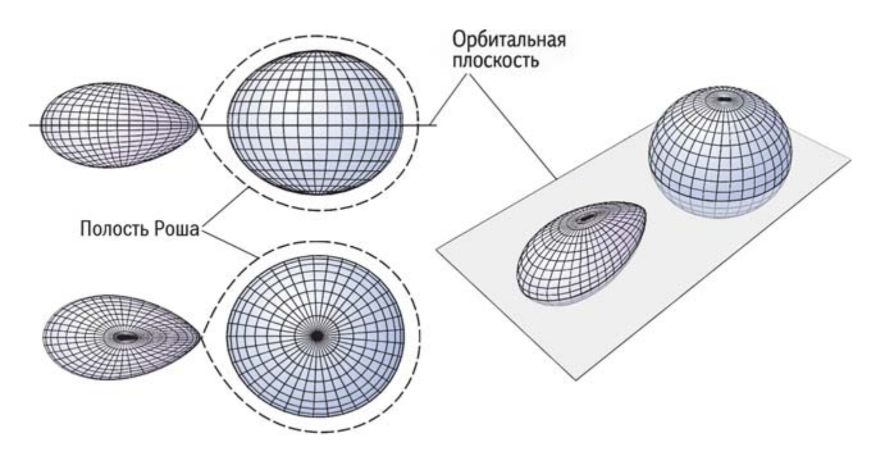



**Рис. 9.2.** **В системе двух звезд, обращающихся в тесном контакте вокруг общего центра масс, приливное влияние приводит к тому, что менее массивная звезда приобретает заметно асимметричную форму: обратите внимание на разницу между ближним и дальним приливными горбами. Результат гидростатического моделирования.** ***Слева*** **— проекции на меридиональную и экваториальную плоскости. Меньшая звезда целиком заполнила свою полость.**

прикосновения полостей (это точка равновесия Лагранжа $L_1$) попавший туда объект становится равноправно принадлежащим обоим телам. Мы наблюдаем довольно много таких тесных двойных звездных систем, у которых одна из звезд в конце жизни расширяется, заполняет свою полость Роша и касается полости Роша соседнего объекта — компактной, но очень массивной звезды (например, нейтронной звезды) с большой полостью Роша. А когда у разреженной звезды своя полость заполнена, куда деваться веществу? Оно «переливается» через край потенциального барьера и начинает течь туда, куда его притягивает (рис. 9.3).

Если бы обе звезды висели в пространстве без вращения, то стекание вещества происходило бы точно по прямой к центру плотного компонента. Но в двойной системе всегда есть орбитальное движение компонентов вокруг общего центра масс, и вещество, сохраняя орбитальный момент импульса, выходит на равновесную орбиту, образуя аккреционный диск вокруг массивного тела. Иногда задают вопрос: почему диск, а не шар? Дело в том, что центробежная сила действует только в плоскости орбиты, а вдоль оси вращения ее нет.

Вспомним, что чем ближе к центру тяготения, тем за более короткое время происходит оборот, т. е. тем выше угловая скорость. Между соседними слоями диска возникает взаимное смещение,

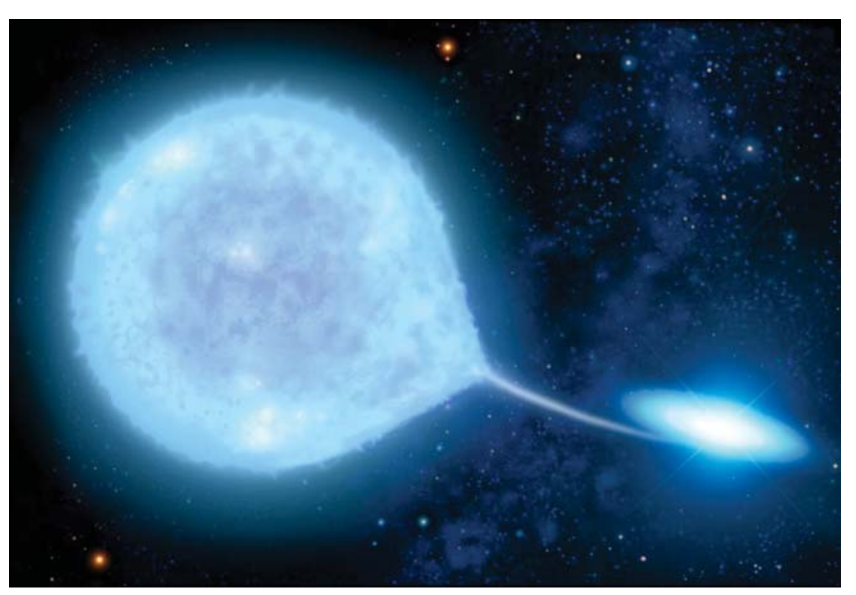


**Рис. 9.3. Вещество рыхлой звезды двойной системы заполнило полость Роша и через окрестности точки Лагранжа утекает к компактной звезде-напарнику. Рисунок.**

а следовательно — трение, в результате чего орбитальный момент переносится наружу. Вещество при этом не остается на круговой орбите, оно тормозится и по спирали движется к центру, понемногу выпадая на поверхность массивного объекта.

Трение в аккреционном диске производит замечательный эффект, благодаря которому мы и открыли существование черных дыр. Сама дыра абсолютно невидима, потому что не излучает (квантовое испарение — эффект Хокинга — у черных дыр звездной массы чрезвычайно слабо). Но когда черная дыра (или нейтронная звезда) оказывается в составе тесной двойной системы, второй компонент которой раздулся и начал терять свое вещество, трение во вращающемся с огромной скоростью аккреционном диске вокруг черной дыры приводит к разогреву газа до сотен тысяч градусов и испусканию мощного потока ультрафиолетового света и рентгеновских лучей. Первые же обзоры неба в рентгеновских лучах показали нам невероятно мощные источники излучения, связанные с такими системами.

Кроме того, разогрев приводит к расширению газа, часть которого выталкивается из диска. Но куда? Пробиться наружу сквозь диск трудно, а перпендикулярно его поверхности (т. е. параллельно

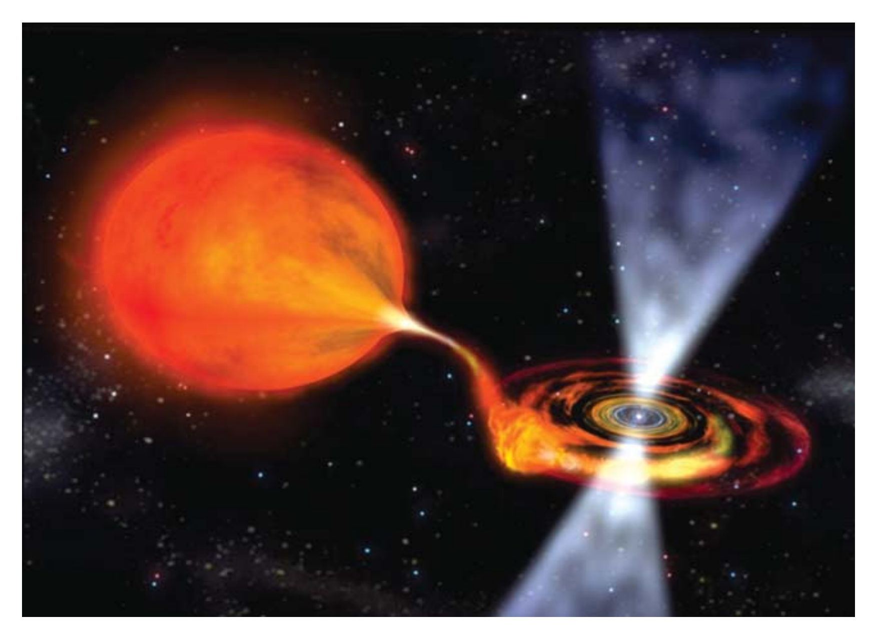


**Рис. 9.4.** **Звезда типа «красный гигант», которую засасывает ее соседка— черная дыра. Перетекающее вещество гиганта образует вокруг нее аккреционный диск, из центральной части которого вырываются две струи светящегося газа. Рисунок.**

оси вращения) довольно легко, диск сравнительно тонкий. Поэтому из такого аккреционного диска вдоль оси его вращения обычно бьют в пустоту два диаметрально противоположных фонтана — их называют *джетами*, или струями. В месте, где входящий поток ударяется об аккреционный диск, тоже наблюдается горячая точка. По скорости ее обращения можно довольно точно определить параметры обоих объектов — и звезды, и черной дыры.

С этим явлением связан интересный вопрос: от чего зависит угол раструба струй? Казалось бы, из самых примитивных соображений угол должен быть немалым, порядка радиана, а в действительности иногда он не превышает градуса. Что оказывает фокусирующее действие на эти тонкие струи, астрофизики пока не понимают. Придумано много разных моделей ускорения джетов — тепловые, магнитогидродинамические, но ни одна из них не может полностью объяснить явление.

Наконец, если звезда подлетает к черной дыре издалека, то она не просто деформируется, а вообще теряет связность: приливный эффект просто разрушает ее при сближении с черной дырой



**Рис. 9.5.** Разрушение звезды, подлетевшей близко к черной дыре. Вещество бывшей звезды образует диск вокруг черной дыры. Рисунок.

(рис. 9.5). Каждый пролет звезды рядом с черной дырой сопровождается срывом большого количества вещества с ее оболочки, и после того, как ее несколько раз таким образом «разденут», от звезды практически ничего не останется. По характерным вспышкам рентгеновского и гамма-излучения из тех областей, где подозревается наличие массивных черных дыр в ядрах галактик, мы понимаем, что это как раз происходят стадии захвата звезды, вещество которой размазывается в аккреционный диск и постепенно поглощается черной дырой.

### Сквозь дырку в пространстве

С приливами связана еще и такая полуфантастическая история. Дело в том, что внутри горизонта событий черной дыры пространство-время настолько сильно деформируется, что это может приводить к возникновению пространственно-временных каналов. По-английски их называют *wormhole*, формальный перевод — «червоточина», но мы обычно говорим «кротовая нора». Несколько десятилетий назад появилась идея, что эти туннели пространства и времени могут связывать коротким путем две удаленные (в нормальном эвклидовом пространстве) точки. Например, между Солнцем и Вегой (если лететь по прямой в космическом пространстве) около 26 световых лет, но если рядом с Солнцем поместить одну черную дыру, а рядом с Вегой — другую, то между ними, может быть, получится канал, который сократит этот путь. Эта идея обыгрывается в романе Карла Сагана «Контакт», по которому снят очень хороший фильм, получивший, к сожалению, весьма непрофессиональный перевод в нашем прокате. Например, главная героиня, когда надо развернуть

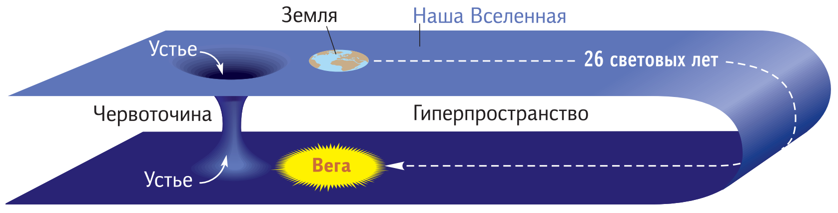



**Рис. 9.6. Двумерная схема червоточины в гиперпространстве: короткий туннель может соединять две разнесенные в обычном пространстве области Вселенной или даже две разные вселенные. Открыта математическим путем в 1916 г. Людвигом Фламмом как решение уравнения поля Эйнштейна.**

радиотелескоп, командует: «Right ascension… Declination…»; эти английские термины означают «прямое восхождение» и «склонение» — два угла в экваториальной системе небесных координат. А переводчик представил это как «подъем справа» и «отклонение». И подобных ляпов там немало. Уверен, вы будете переводить астрономические тексты лучше.

Вообще говоря, идея образования червоточин в пространстве очень старая. Когда сто лет назад Эйнштейн только-только создал свою теорию относительности, был сделан расчет, показавший, что такие явления могут быть. Но использованием пространственно-временны́х туннелей для перемещения людей впервые заинтересовался Карл Саган, знаменитый астрофизик и популяризатор астрономии. Он захотел использовать этот эффект в фабуле романа, чтобы героиня куда-то перенеслась, и, чтобы не попасть впросак, озадачил этим вопросом самого известного ныне специалиста в области гравитации — Кипа Торна. Тот в ответ на просьбу Сагана сначала лишь улыбнулся, но затем стал делать расчеты — и увидел, что можно создать такую конфигурацию, чтобы пара черных дыр была связана таким странным туннелем. Кстати, очень советую его изумительную книжку «Черные дыры»: в ней очень много интересного не только про американскую физику, но и про нашу, отечественную, ведь Кип Торн в дни своей молодости провел много времени в Москве, в группе академика Я. Б. Зельдовича.

Однако не будем забывать о приливном эффекте. Если мы захотим нырнуть в одну дыру и вынырнуть из другой, то это может плохо кончиться: когда мы приблизимся к черной дыре, приливный эффект будет настолько силен, что нас растянет в спагетти. Но и саму червоточину приливный эффект делает неустойчивой, а грави-

тационная неустойчивость всегда пытается поломать любую конструкцию. Однако в последнее время возникла идея о том, что можно стабилизировать червоточину, если в природе существует пятая сила, которую называют «темной энергией». В космологии это сегодня одна из главных тем. По сути это антигравитация, расталкивающая массивные объекты, и она может стабилизировать пространственно-временной туннель, сделать его устойчивым — и тогда пусть не человек, а для начала хотя бы какой-нибудь межзвездный робот сможет через него пройти.

### Приливные явления в галактиках

В масштабах галактик приливы играют гораздо бóльшую роль хотя бы потому, что галактики — объекты крайне малоплотные. Они представляют собой скопище звезд и газа между ними с концентрацией в пару атомов на кубический сантиметр, по сути — «видимое ничто». Если посмотреть на окрестности галактики M31, называемой Туманностью Андромеды (рис. 9.7), и обратить внимание на форму ее галактик-спутников, то можно даже невооруженным глазом увидеть последствия приливного эффекта: одна из них (NGC 205) силь-



**Рис. 9.7.** **Туманность Андромеды, ближайшая к нам крупная галактика, имеет несколько маленьких галактик-спутников.**

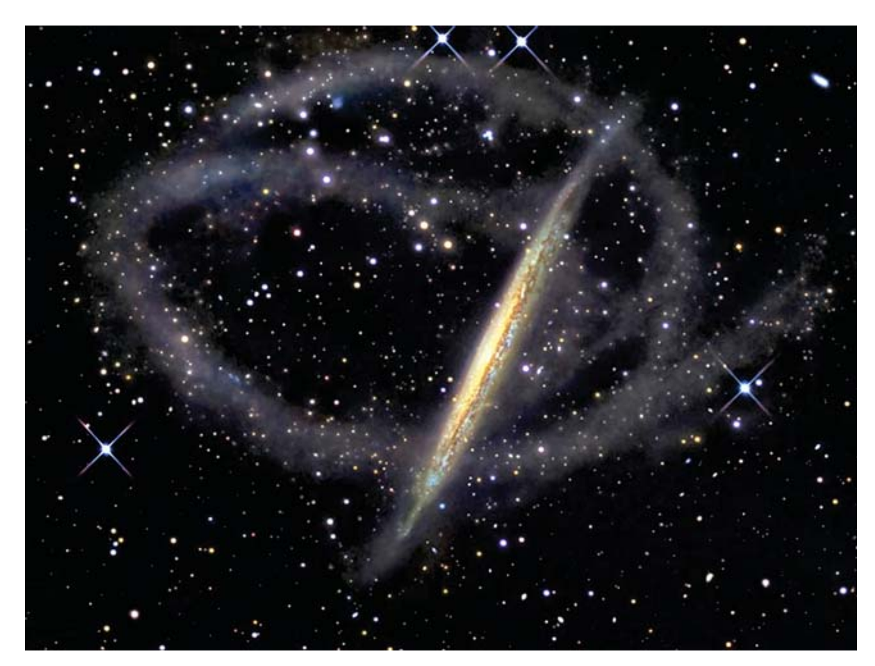


**Рис. 9.8. Светлые кольца вокруг галактики NGC 5907 — это не дефект фотографии, а поток звезд, в который превратился один из спутников этой галактики. Поначалу это было небольшое самостоятельное звездное скопление, но приливом его вытянуло вдоль орбиты и размазало по ней.**

но деформировалась, с ее внешней оболочки срываются слабосвязанные звезды, поток которых утекает в сторону, к огромной махине M31: так она ее «раздевает». А другая мелкая галактика (M32) уже «раздета»: мои расчеты показывают, что раньше она была далеко от Туманности Андромеды, двигалась вокруг нее по орбите и — главное — была значительно крупнее. Но сейчас она приближается к M31 по спирали, внешние слои с нее уже сорвало, но ядро еще сопротивляется. Правда, осталось ему недолго: через несколько миллиардов лет оно просто утонет в ядре большой галактики, перестанет существовать как отдельная звездная система — и не будет маленького спутника.

Иногда, если галактика расположена к нам ребром и ее диск не мешает нам обозревать окрестности, можно разглядеть интересные вещи: «размазывание» мини-галактики в узкую полосу вдоль орбиты вследствие приливного разрушения (рис. 9.8). Отдельные звезды и немного газа при этом продолжают кружиться, но скоро разма-

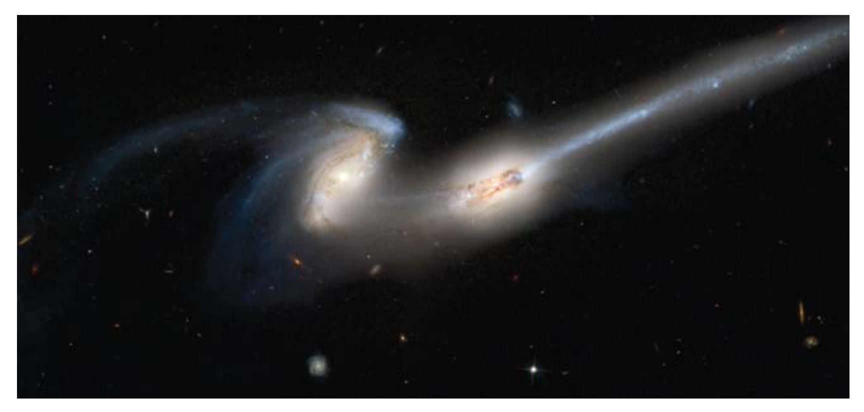


**Рис. 9.9. Взаимодействующие галактики NGC 4676, или «Мышки». Фото космического телескопа «Хаббл», Advanced Camera for Surveys (NASA).**

жутся окончательно, и орбита перестанет быть видимой. Вот насколько серьезное влияние оказывают массивные галактики на своих малых соседей.

Бывают также встречи типа «кита со слоном», когда непонятно, кто кого переборет. Если две одинаковые галактики встретились, то обе очень сильно деформируются. Любителям астрономии известна такая пара — их называют «Мышки», потому что у них торчат длинные хвостики, вытянутые приливным эффектом (рис. 9.9). Что ожидает их в дальнейшем? Скорее всего, они пару раз покувыркаются друг вокруг друга и затем сольются в единый конгломерат: вместо двух просто больших галактик будет одна очень большая. Вероятно, это судьба почти всех пар и групп тесных галактик. Наша галактика Млечный Путь — не исключение: со скоростью примерно 110 км/с она несется навстречу Туманности Андромеды. Вместе они являются двойной системой и обращаются вокруг общего центра масс, понемногу сближаясь. Не пугайтесь, до встречи еще далеко. Но примерно через 4 млрд лет Туманность Андромеды подойдет очень близко к нашей галактике, они на скорости соприкоснутся, немного разойдутся, через миллиард лет опять сблизятся и чиркнут друг по другу, а на третьей встрече сольются в одну большую галактику. Как она будет выглядеть, никто не знает, но в том, что это произойдет, никаких сомнений уже нет.

Я советую для дальнейшего изучения литературу по теме приливов. Лучшую, пожалуй, книжку написал в конце XIX в. замечательный геофизик Джордж Дарвин, сын всем известного Чарльза Дар-



**Рис. 9.10.** Так, вероятно, будет выглядеть с Земли слияние нашей галактики с Туманностью Андромеды. Коллаж: NASA; ESA; Z. Levay and R. van der Marel, STScI; T. Hallas; and A. Mellinger.

вина, у которого и дед, и отец были великими учеными, а сын, внук и правнук тоже стали весьма известными в науке людьми. Она удивительна тем, что формул там нет, но «на пальцах» все замечательно и очень колоритно рассказано. Я ее с удовольствием прочитал и потом, работая в этой области, сам написал две брошюрки: в них уже есть формулы и другие подробности, о которых в этой лекции не говорилось. А современное состояние небесной механики описано в фундаментальной книге Мюррея и Дермотта «Динамика Солнечной системы», по которой учатся специалисты.

## Негравитационные возмущения и их последствия

До сих пор мы говорили только о гравитации, а теперь вспомним, что кроме гравитации еще есть и электромагнитное излучение. И его кванты тоже имеют возможность давить на тела, изменяя их импульс.

### *Эффект Пойнтинга—Робертсона*

Самый известный эффект влияния излучения на движение небесных тел описал английский физик Дж. Г. Пойнтинг (1903) и уточнил американский физик Г. П. Робертсон (1937). Пусть некий астероид летает вокруг Солнца: гравитация действует строго по линии, соединяющей их центры масс. Если бы он стоял на месте, то сила давления на него солнечного излучения тоже была бы направлена вдоль этой линии. Но тело движется по орбите, и возникает эффект аберрации: грубо говоря, в результате векторного сложения собственной скоро-

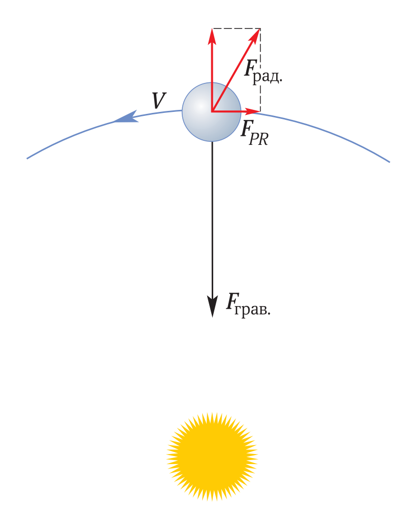



**Рис. 9.11.** **Эффект Пойнтинга—Робертсона: торможение тела, движущегося в поле излучения.**

сти астероида и скорости света происходит поворот вектора силы лучевого давления против направления движения (рис. 9.11). Когда мы идем под падающими вертикально каплями дождя, наша передняя сторона мокнет сильнее, чем тыльная, потому что мы «набегаем» на дождь и в нашей системе отсчета вектор скорости дождевых капель направлен под углом к вертикали. Аналогично набегающая сторона астероида освещается немного лучше, чем задняя.

Компонент силы светового давления, направленный вдоль линии центров, противодействует гравитационному влиянию Солнца и для мелких частиц (<1 мкм) даже превосходит его, выметая эти частицы из Солнечной системы. А перпендикулярный ему компонент тормозит движение тела. Он крайне мал: скорость светового потока — 300 тыс. км/с, а орбитальная скорость — порядка 30 км/с (на уровне земной орбиты), т. е. вектор светового давления повернут на 0,0001 радиана. Соответственно, тормозящей оказывается одна десятитысячная доля светового давления. Но, как говорят, капля камень точит: если постоянно тянуть объект назад, пусть даже с маленькой силой, в конце концов он затормозится. Так вот, оказывается, что на мелкие частицы космической пыли (размером менее 0,1 мм) этот эффект влияет настолько сильно, что с расстояния 3 астрономические единицы (т. е. из Главного пояса астероидов) за 10 тысяч лет они по спирали выпадают на Солнце. Почему этот эффект влияет именно на мелкие частицы? Это очень просто: сила лучевого давления пропорциональна площади сечения тела, т. е. квадрату радиуса, а масса — кубу радиуса. Поэтому ускорение — отношение силы к массе — получается обратно пропорциональным размеру частицы. За 100 тысяч лет вообще вся Солнечная система очистилась бы от пыли, если бы пыль не образовывалась заново: крупные астероиды постоянно сталкиваются друг с другом и рождают тучи новой пыли, которая опять начинает падать на Солнце.

*Эффект Ярковского*

Есть и другой эффект силового действия излучения, о котором до конца XX века никто не думал. Однако в конце XIX века этот эффект уже был предсказан и даже описан в литературе. Сделал это московский инженер и ученый-любитель Иван Осипович Ярковский, он разослал свою брошюру по всем институтам; я нашел ее в библиотеке ГАИШ МГУ.

Ярковский развивал популярную тогда эфирную теорию гравитации, которая впоследствии не подтвердилась. Но, как инженер, размышляя о движении планет сквозь пространство, заполненное гипотетической средой — эфиром, он не мог представить, что планеты не испытывают при этом сопротивления. Поэтому он искал компенсирующий эффект и нашел его в рамках взаимодействия планеты с солнечным излучением.

Когда планета летит по орбите, Солнце ее освещает и нагревает дневную полусферу. Если планета имеет собственное суточное вращение, то нагретая днем поверхность переносится на вечернюю, а потом и на ночную сторону. Значит, оттуда уходят потоки инфракрасного излучения, и в результате отдача постоянно толкает планету. Этот эффект на много порядков сильнее эффекта Пойнтинга—Робертсона: почти 50% импульса, принесенного на планету кванта-

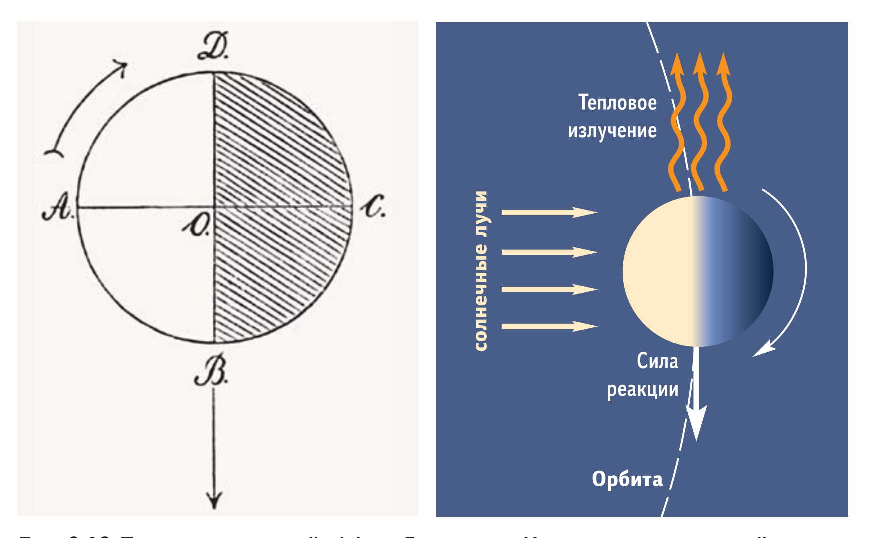



**Рис. 9.12.** Термомеханический эффект Ярковского. Направление реактивной силы зависит от ориентации оси и направления суточного вращения небесного тела. Слева — оригинальный рисунок Ярковского, 1888 г.

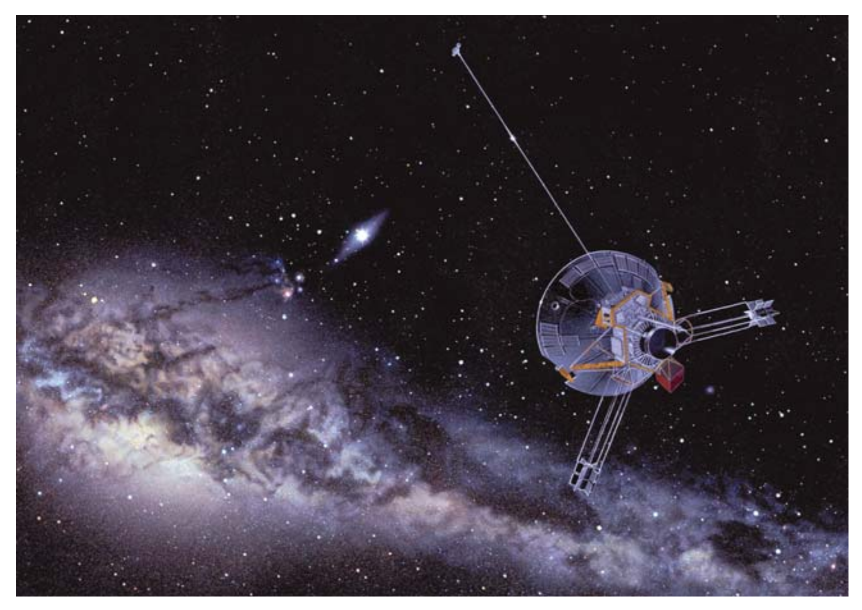


**Рис. 9.13.** Автоматическая станция серии «Пионер». Рисунок: NASA.

ми света, дают вклад в реактивный эффект. Это оказывает колоссальное силовое влияние на движение небольших астероидов и искусственных спутников Земли. Но долгое время на это не обращали внимания (и этому парадоксу я не могу найти объяснения), пока наконец ошибки в расчетном движении спутников не превысили допустимую величину. Только тогда стали искать причину — и разобрались, что действует эффект радиационной отдачи, а потом выяснили, что Ярковский предсказал этот эффект сто лет назад. Вот как важно читать старые книжки: люди прошлых веков были не глупее нас.

Есть еще интересная история, связанная с эффектом отдачи. Два первых космических аппарата, которые ушли за пределы Солнечной системы, — «Пионер-10» и «Пионер-11» — как-то странно отклонялись от траектории, при расчете которой учитывалась только гравитация: их иногда что-то притормаживало. Этот парадокс «Пионеров» четверть века «висел» перед небесными механиками и требовал объяснения. Чтобы его разрешить, пытались даже модернизировать теорию гравитации, но безуспешно: запуск последующих зондов не подтвердил предположений.

Наконец выпускник физфака МГУ В. Г. Турышев, ныне сотрудник американской лаборатории JPL, догадался о причине явления,




и его версия стала общепризнанной. У зондов «Пионер» в качестве источников электричества используются радиоизотопные термоэлектрические генераторы. В них распадается плутоний $^{238}$Pu, в этом процессе выделяется тепло, поэтому генераторы всегда горячие, их излучение падает на тыльную сторону рефлектора радиоантенны

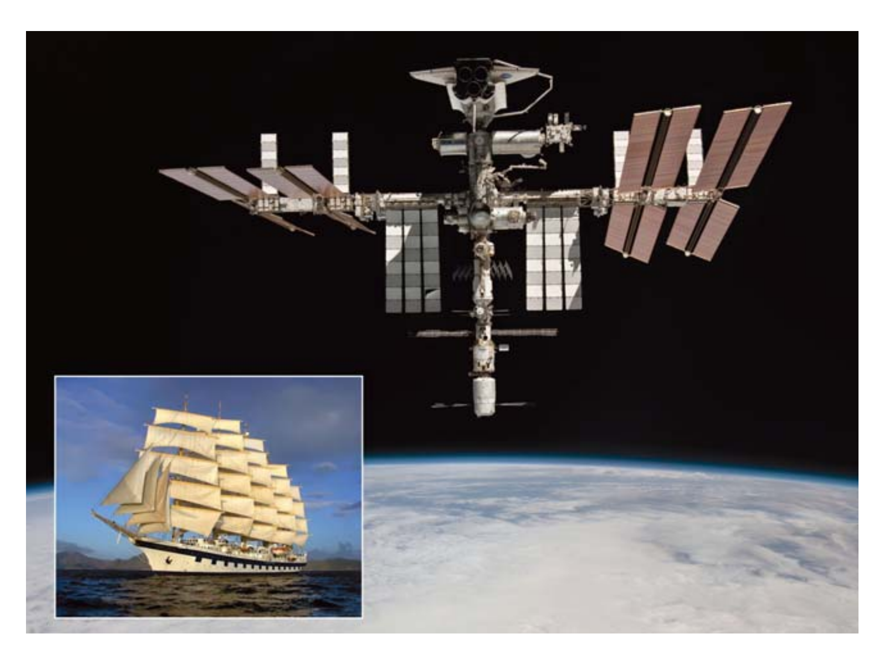


**Рис. 9.14.** Международная космическая станция похожа на парусный корабль. Но ее «паруса» не разгоняют станцию, а тормозят.



**Рис. 9.15.** Искусственный спутник GOCE, работал в 2009–2013 гг. Фотоколлаж ESA

и отражается от него. Получается своеобразный фотонный двигатель. А поскольку антенна постоянно направлена на Землю, т. е. на центр Солнечной системы, реактивная сила притормаживает полет аппарата.

*Влияние атмосферы*

И наконец о последнем негравитационном возмущении. Космические тела летают не в абсолютном вакууме, а в среде, хотя и очень разреженной, так что обычное газодинамическое сопротивление тоже играет роль. Наша МКС издали кажется «парусником», летящим по космическим волнам (рис. 9.14), но на самом деле солнечные панели станции — вовсе не паруса, а тормоза: станцию они всегда тормозят об атмосферу Земли, и, чтобы она не упала, надо периодически включать реактивные двигатели и восстанавливать высоту орбиты.

То же самое со спутниками, запускаемыми на низкую орбиту. Несколько лет назад для измерения гравитационного поля Земли на

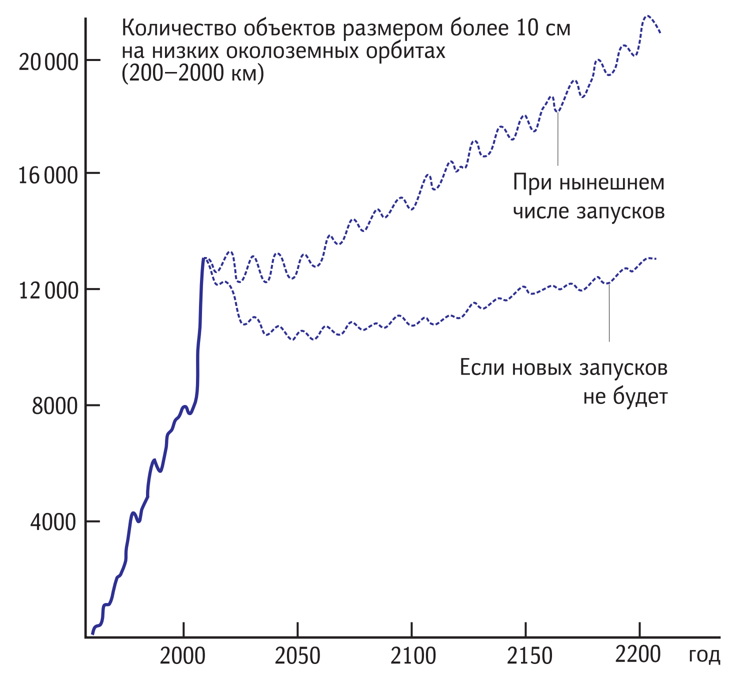



**Рис. 9.16. Количество объектов размером более 10 см на околоземных орбитах высотой 200–2000 км по настоящее время и в будущем при реализации двух сценариев космической активности человечества.**

очень малую высоту (220 км) был запущен спутник GOCE. Атмосфера там вполне ощутимой плотности, и необходимо было постоянно держать двигатель включенным, а панели солнечных батарей развернуть вдоль направления полета, иначе они очень сильно тормозили бы спутник и он быстро упал бы. Четыре года он летал — и все-таки упал, а случилось это в 2013 г. Почему именно в этом году? Для астрономов это не тайна: это был год максимума солнечной активности. А когда Солнце бьет по Земле ультрафиолетом и рентгеном, наша атмосфера «вспухает» и особенно интенсивно тормозит низколетящие спутники.

Однако большинство спутников на землю не падают и, перестав работать, остаются на орбите. Иногда они сталкиваются друг с другом и с останками ракет и распадаются на куски разных размеров. Сейчас в околоземном пространстве на орбитах высотой до 2000 км кружится около 12 тысяч осколков размером от дециметра и крупнее; за ними всеми следят, чтобы какой-нибудь из них не налетел на действующий космический аппарат. Китайцы пытались сбить свой спутник с орбиты, но тем самым только добавили мусора в космосе. Если частота запусков космических аппаратов сохранится на сегодняшнем уровне, количество обломков в многолетнем тренде будет увеличиваться. Хотя каждые 11 лет (период колебаний активности Солнца) будет наблюдаться небольшой спад: те спутники, что летают низко, будут падать на Землю.





# 10 Солнце

Самая детально изученная звезда — это наше Солнце. Оно весьма полезно для нас: без него не было бы жизни на Земле. Из предыдущей лекции мы знаем, что оно очень большое: по диаметру в 10 раз крупнее самой большой планеты нашей системы — Юпитера — и почти в 110 раз крупнее Земли. А по массе Солнце с Юпитером различаются почти в $10^3 = 1000$ раз, поскольку их плотность примерно одинакова, около 1,5 г/см$^3$ — это чуть больше, чем у морской воды, т. е. привычная для нас величина. Но надо понимать, что это среднее значение по всему объему: на поверхности Солнца плотность газа намного меньше, а к центру она нарастает так, что становится в 20 раз больше, чем у железа.

### Как смотреть на Солнце

Мы ощущаем Солнце благодаря его излучению. А какова его полная мощность? Если поместить Солнце в точку фокуса гигантского космического рефлектора и тем самым сконцентрировать всю его световую мощь на нашей планете (рис. 10.1), то через четыре минуты все океаны не просто закипят — они полностью улетучатся в космическое пространство. Представьте: всего четыре минуты — и нет больше воды на Земле: вот что такое солнечное излучение. А через 10 суток испарился бы весь земной шар.

К счастью, на нас попадает не всё солнечное излучение, а его микроскопическая доля, поэтому Земля и жизнь на ней не сильно от него страдают. Но учтите: прямой солнечный свет очень опасен для зрения. Конечно, можно на мгновение глянуть — и сразу же отвести взгляд. Но лучше этого не делать. Даже если вы собираетесь наблюдать за солнечным затмением, то смотреть на него длительно без темных очков нельзя. И очки нужны не пляжные, а специальные, с очень плотной светозащитной пленкой (рис. 10.2), которая примерно в тысячу раз ослабляет световой поток: в таком случае сетчатка ваших глаз не пострадает от наблюдения Солнца.




**Рис. 10.1.** **Полная мощность излучения Солнца ($4 \cdot 10^{26}$ Вт), целиком направленная на Землю, может быстро уничтожить ее.**

А если вы решили наблюдать Солнце в телескоп, то запомните, что дело это крайне опасное. Телескоп собирает свет огромным объективом и весь его направляет в ваш глаз. Астрономы шутят, что на Солнце в телескоп можно посмотреть лишь дважды в жизни: один раз — правым глазом, а второй раз — левым. Чтобы не рисковать зрением, сделали специальный окуляр с зеркальцем (рис. 10.3), которое отбрасывает 99,99% света вбок, отводя его в ту часть обсерватории, где людей не должно быть. А в глаз попадает совсем чуть-чуть света, и тогда можно безопасно смотреть на солнечную поверхность.



**Рис. 10.2.** **Безопасное наблюдение Солнца сквозь светозащитные очки.**



**Рис. 10.3.** Наблюдение Солнца на рефракторе с солнечным окуляром.

Но если вам когда-нибудь придется подсесть к окуляру большого телескопа, учтите, что это не совсем безопасно: обратите внимание, что параллельно его оси имеется маленький телескопчик — своеобразный оптический прицел, называемый *гидом* или *искателем*, у которого свой окуляр. В школьные годы в такой телескоп я наблюдал Солнце в проекции на белом экране (рис. 10.4) — это очень удобный и безопасный способ — и однажды забыл закрыть объектив искателя. Внезапно, почувствовав запах горелого, я догадался и момен-



**Рис. 10.4.** В обсерватории Волгоградского планетария. Автор (спиной к зрителю) снят в том самом пальто, еще не прожженном, поскольку объектив искателя (его тень — на спине) в тот раз был закрыт.

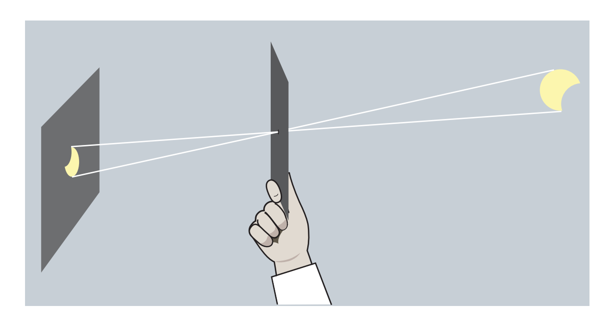


**Рис. 10.5.** Схема принципа камеры-обскуры для наблюдения солнечного затмения.

тально отпрыгнул от телескопа. А потом долго ходил в пальто с прожженной на спине дырой. Так что даже небольшой телескоп, сфокусировав на вашей спине лучи Солнца, может сильно вам навредить.

Проще всего наблюдать Солнце вообще без телескопа. Берете маленький листок бумаги или картона, протыкаете в нем дырочку иголкой — и получившаяся камера-обскура дает вам геометрически точный портрет Солнца. Люди таким способом наблюдают затмение, не рискуя.





Если у вас есть небольшая подзорная труба без специальных светофильтров, то можно, удобно расположив у окуляра экран, спроецировать на него изображение Солнца (рис. 10.6). По мере того как Луна «наползает» на Солнце, с экрана вы фотографируете фазы затмения безопасно для глаз.

**Рис. 10.6.** Наблюдение солнечного затмения 20 марта 2015 г. на крыше ГАИШ МГУ с помощью небольшой зрительной трубы и проекционного экрана. Фото В. Г. Сурдина.

## Что видно на Солнце

Глядя на нашу родную звезду с Земли, мы видим хорошо оформленный круг фотосферы, можем измерить его диаметр. Присмотревшись, замечаем любопытный эффект потемнения к краю: в центре солнечный диск ярче, чем по краям. Это легко объяснимо: в середине наш взгляд «протыкает» солнечную атмосферу перпендикулярно и уходит вглубь, в горячие слои, вплоть до предела прозрачности, в то время как на видимом крае (его называют *лимбом*) луч зрения проходит только сквозь верхние слои атмосферы, а они более холодные и поэтому менее яркие.

Поверхность Солнца не столь однородна, как кажется на первый взгляд: на светлом фоне мы замечаем какие-то пятнышки. Причем если день ото дня мы фотографируем или зарисовываем Солнце, то отметим перемещение этих пятен (рис. 10.7). Делаем вывод, что, во-первых, Солнце вращается, а во-вторых, на Солнце не все области имеют одинаковую температуру: если обычная температура — около 6000 К, то пятна явно холоднее — до 4000 К, как показывают измерения. Вроде бы разница невелика, но вспомните, что лучеиспускательная способность пропорциональна 4-й степени температуры. Кроме того, спектр смещается из области видимого света в инфракрасный диапазон, а инфракрасные лучи хуже проходят сквозь земную атмосферу и хуже фиксируются фотоприемниками, поэтому пятна выглядят такими черными.

Размер солнечных пятен невероятен. Бывают пятна в несколько раз больше земного шара (рис. 10.8). Пятна окружены яркой поверх-

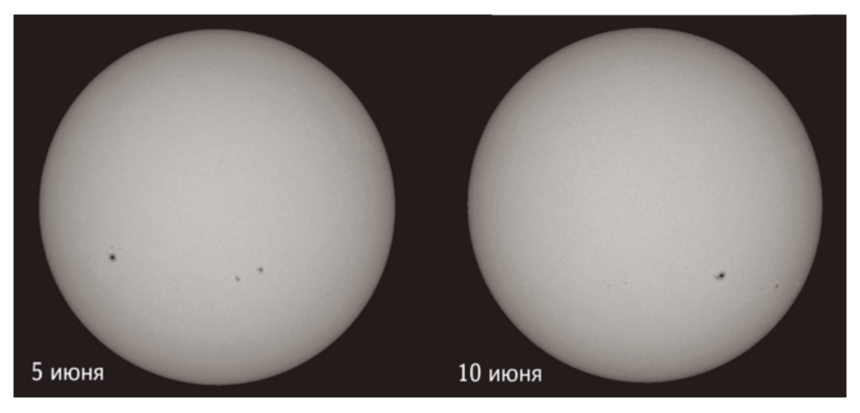



**Рис. 10.7. Фото солнечных пятен (1998 г.). Прошло всего пять дней — и темные пятна на поверхности Солнца заметно сдвинулись. (Источник — Big Bear Solar Observatory.)**

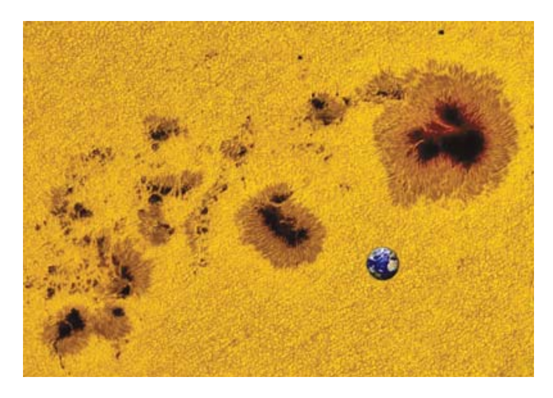


**Рис. 10.8.** Размеры земного шара в сравнении с размерами солнечных пятен.

ностью фотосферы, где постоянно всплывают горячие потоки газа. На их фоне явно выделяются более холодные пятна, причем с градацией яркости (рис. 10.9): астрономы говорят, что у солнечного пятна есть «тень» (амбра) и «полутень» (пенамбра). Пятно стабильно, потому что мощное магнитное поле препятствует горизонтальному перемешиванию в нем газа. Частицы горячего газа ионизованы, по существу это плазма, которая в магнитном поле движется своеобразно: вдоль силовых линий может, а поперек — нет, поэтому циркуляция вещества в поперечных направлениях заторможена.

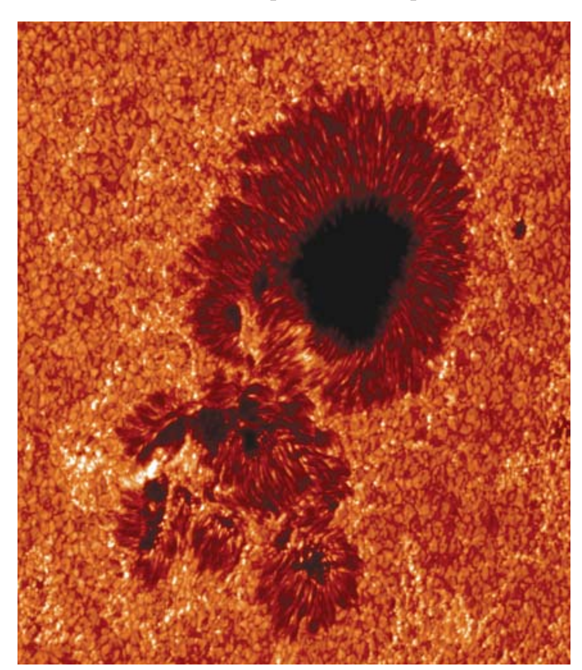
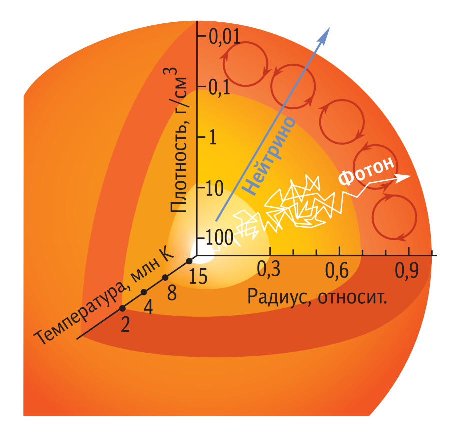


**Рис. 10.9.** Темные пятна на Солнце крупным планом. Черная сердцевина пятна — тень; окружающая его область с радиальной структурой — полутень. Вокруг пятна — невозмущенная поверхность Солнца, разбитая на мелкие гранулы, указывающие на конвективное движение газа. Размер типичной гранулы — около 1000 км.



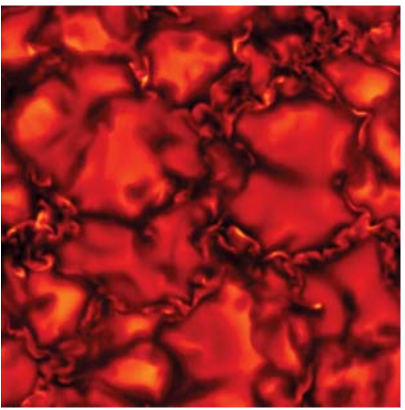



**Рис. 10.10.** ***Слева*** **— внутреннее строение Солнца и схема переноса энергии: фотоны, рождающиеся в ядре, петляя по очень запутанной траектории во внутренней части, постепенно выбираются наружу.** ***Справа*** **— конвекционные ячейки.**

Когда мы изучаем фотосферу Солнца с сильным увеличением, то и помимо пятен обнаруживаем много любопытного. Сейчас появилось новое поколение телескопов, в том числе и на спутниках, летающих за пределами атмосферы Земли, так что теперь мы можем наблюдать структуру поверхности очень детально. Оказывается, что даже спокойная, невозмущенная фотосфера неоднородна, она вся состоит как бы из зернышек, гранул (рис. 10.10). Размер этих гранул — порядка угловой секунды, что соответствует примерно 1000 км. Это гигантские потоки плазмы, которые с околозвуковой скоростью выныривают из недр Солнца, остывают и уходят вниз. А в пятнах происходит «водопад»: охлаждаясь, вещество вдоль силовых магнитных линий устремляется вниз, но снизу поток тепла подходит не такой интенсивный. Поэтому вещество охлаждается всё сильнее и сильнее и по контрасту с яркой поверхностью становится для телескопа темным, практически черным.

## Как работает Солнце

Внутреннее строение Солнца мы себе представляем так: есть центральная часть, или ядро, в котором температура выше 5 млн градусов, а в самом его центре — примерно 15 млн. Это источник энергии, там идут термоядерные реакции, а выделяющаяся при этом энергия переносится наружу. В звездах эффективно работают два механизма переноса.




**Рис. 10.11.** Формирование конвективных ячеек Бенара.

Из внутренней, высокотемпературной части перенос энергии осуществляется в основном квантами излучения, фотонами. Вещество лежит слоями, практически не перемешиваясь, а кванты из ядра сквозь него диффундируют к более холодной поверхности. Квантов там много, плотность их отнюдь не маленькая, и продвигаются они очень медленно. Дело в том, что плазма настолько непрозрачна для света, что родившемуся в ядре электромагнитному кванту, который движется со скоростью света, чтобы выбраться на поверхность и улететь в открытое пространство, требуется порядка ста тысяч лет.

На какой-то глубине плотность и температура квантов уменьшаются настолько, что они становятся не в состоянии обеспечить перенос всей энергии, которая рождается в ядре. И тут в дело перено-

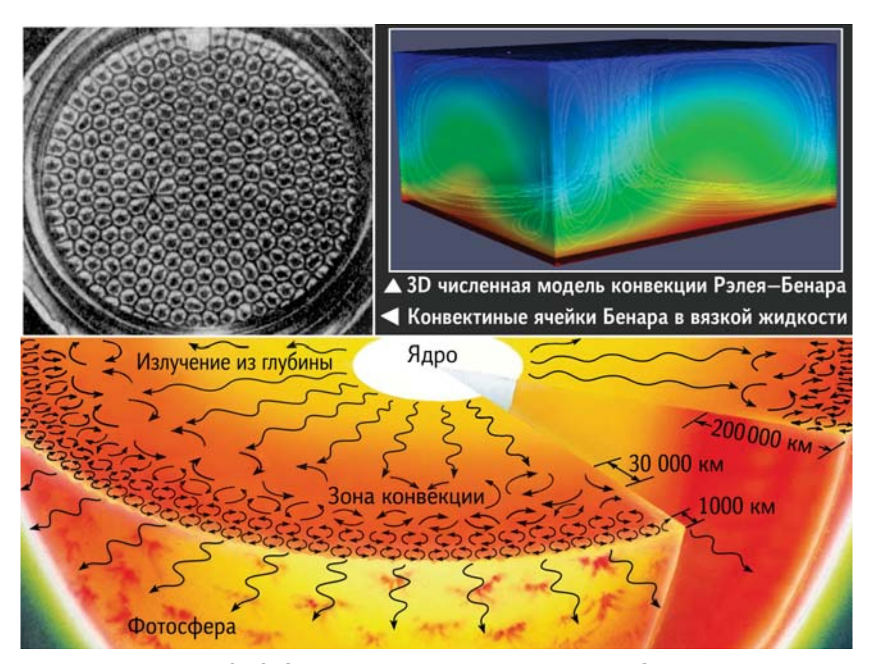



**Рис. 10.12.** Схема конвекционных процессов на Солнце.

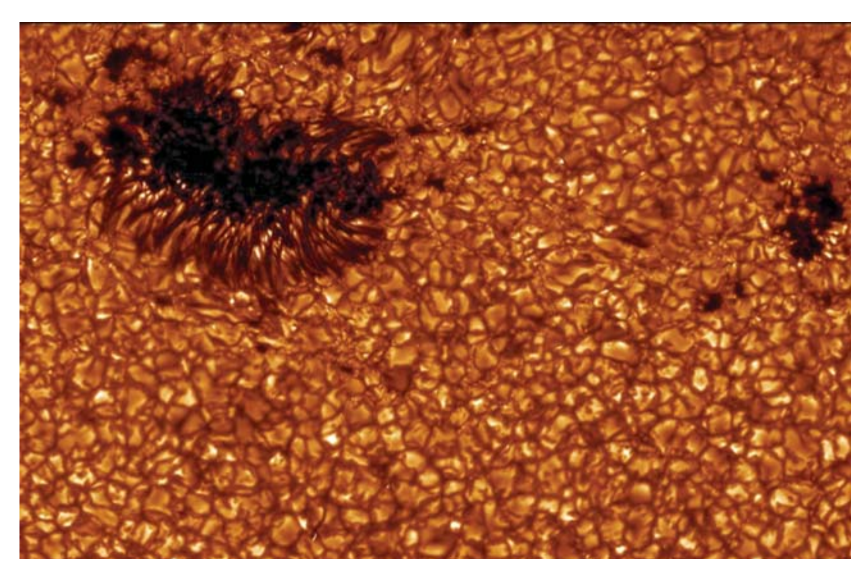


**Рис. 10.13. Яркие точки в фотосфере Солнца возникают в результате локального взаимодействия плазмы с магнитным полем. Фото: Swedish 1-m Solar Telescope, Institute for Solar Physics, Sweden.**

са энергии вступает уже конвекция, перемешивание вещества: горячие потоки газа всплывают, охлаждаются, становятся менее теплыми и тонут. Как в кастрюльке: если подогреваем воду на плитке, она бурлит.

В природе есть и третий механизм переноса энергии — теплопроводность: в твердом теле молекулы колеблются и толкают друг друга, происходит кинетическая передача тепла. Этот процесс внутри Солнца тоже имеет место, но роли практически не играет. Однако есть звезды, в которых теплопроводность является основным способом переноса: это белые карлики.

Современным телескопам на космических аппаратах не мешает атмосфера Земли, они намного детальнее показывают нам структуру поверхности Солнца, и иногда мы видим странные вещи: яркие точки на границах отдельных конвективных ячеек (рис. 10.13). Космические снимки получаются очень качественными, с высоким угловым разрешением. Раньше, всего лишь лет десять тому назад, в наземные телескопы мы не могли заметить это явление. Теперь же мы понимаем, что бурление газа выносит не только горячие слои вещества, но вместе с ними и магнитное поле, «вмороженное» в потоки плазмы. В соседних ячейках с обеих сторон выходящие на поверх-

ность потоки несут свои магнитные поля друг к другу. Встречаются два потока газа, на линии их соприкосновения силовые магнитные линии уплотняются, и плотность энергии магнитного поля, пропорциональная квадрату его напряженности, нарастает. На изображениях, полученных при моделировании, и на прямых снимках Солнца видно, что на границе конвективных ячеек температура выше. Этот локальный разогрев происходит потому, что часть магнитной энергии переходит в тепловую энергию газа. На этом принципе основаны многие наземные приборы. Так, в некоторых термоядерных реакторах, которые сейчас конструируют, способом нагрева плазменного потока служит его «обжимание» магнитным полем, так называемый *пинч-эффект*.

Хотя космические телескопы, например американский спутник «Обсерватория солнечной динамики» (Solar Dynamics Observatory), действительно показывают нам намного более детальные изображения, но не это главное. Важнее то, что с помощью заатмосферных обсерваторий мы регистрируем гораздо больший спектральный диапазон: можно получить отдельно рентгеновский, ультрафиолетовый, инфракрасный портреты Солнца. Рассматривая последовательную серию этих фотографий, мы прежде всего замечаем, что площадь, занятая на диске Солнца пятнами, их количество и плотность меняются. Иногда их нет совсем или мало, а иногда их много и они большого размера. Это регулярное явление, открытое еще в XVII в., называют солнечной активностью, по сути это и есть активность процессов во внешнем слое Солнца, а пятна — ее индикатор. Актив-

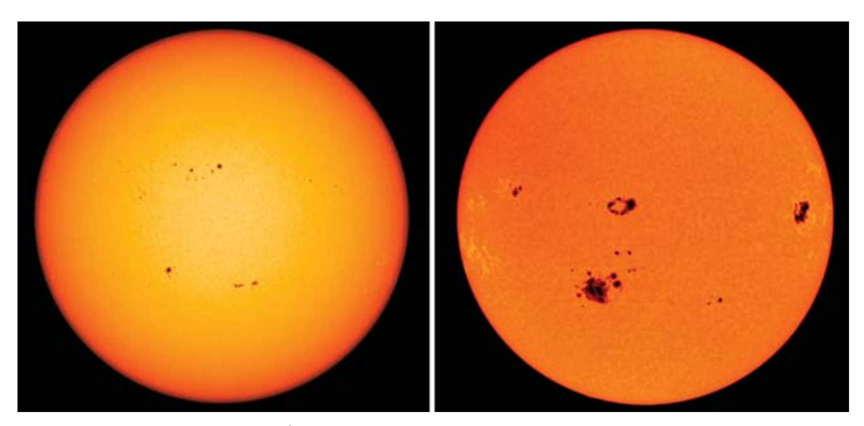


**Рис. 10.14.** ***Слева:*** **Солнце в белом свете 5 июня 2012 г. (фото: Solar Dynamics Observatory, NASA);** ***справа*****: снимок 28 октября 2003 г. (фото: SOHO, ESA, NASA).**

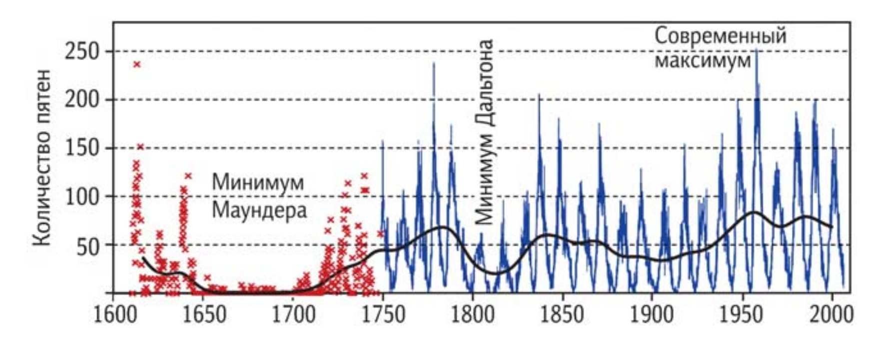



**Рис. 10.15.** **Так менялось количество пятен на Солнце за последние 400 лет наблюдений.**

ность Солнца проявляется не только зримо, но и в его радиоизлучении, и в корпускулярном излучении, и в рентгеновском, которые тоже меняются год от года.

Рядом с пятном можно различить светлые прожилки, их обычно называют *факелами*. Физикам это явление тоже должно быть понятно: горячая плазма не смогла прорваться в область пятна, магнитное поле ее туда не пустило, но ей надо куда-то деваться — и она прорывается рядом. Такими факелами окружено каждое пятно, но по краям Солнца они выглядят более контрастно (рис. 10.14).

С начала XVII в., когда Галилей начал наблюдать Солнце, ведется хронология солнечной активности (рис. 10.15). На графике, демонстрирующем изменение во времени числа пятен или их общей площади, довольно четко соблюдается периодичность: примерно 11,5 лет отделяет каждый максимум от последующего максимума солнечной активности, т. е. периоды активности можно прогнозировать. Это важно, потому что в эпоху высокой активности Солнце представляет опасность, особенно для космической техники: чаще возникают неполадки, плотнее становятся верхние слои земной атмосферы и т. п.

С середины XVII по начало XVIII в. (в так называемый минимум Маундера) на Солнце вообще не отмечалось пятен, вспышек, мощных потоков газа, а на Земле это отозвалось малым ледниковым периодом. На старых голландских картинах изображали, как люди катаются по каналам на коньках: в то время это было распространенной забавой. А попробуйте сейчас зимой поехать в Голландию: каналы не замерзают, а если иной раз и замерзнут на неделю, то никто на такой лед выйти не решится.

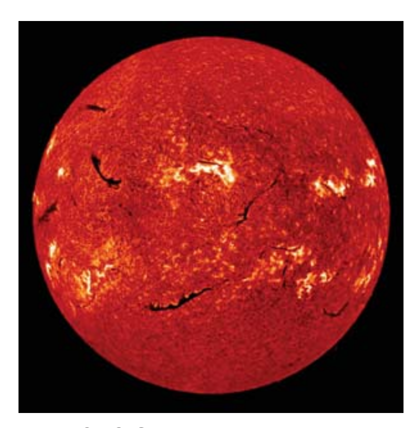


**Рис. 10.16.** Солнечная поверхность в узком диапазоне линии Hα.

Когда мы фотографируем не в широком диапазоне излучения, а выделяем из всего спектра одну узкую спектральную линию, получаются довольно интересные портреты. Например, если наблюдать Солнце сквозь интерференционно-поляризационный фильтр, который пропускает свет только в окрестности линии Hα (соответствующей переходу электрона в атоме водорода с 3-го на 2-й энергетический уровень), то на фоне однородной поверхности солнечного диска видны яркие области, в которых водород интенсивно излучает, и темные — в которых он поглощает (рис. 10.16). Понятно, что яркие области более горячие. Но откуда берутся темные? Это взвиваются фонтаны газа, которые висят некоторое время над поверхностью Солнца, поддерживаемые магнитным полем. Их называют *протуберанцами*, это относительно холодные и плотные водородные облака, плавающие в разреженной и горячей солнечной атмосфере, и они частично поглощают свет, идущий с поверхности.

И совсем фантастическим Солнце выглядит в отдельных линиях ультрафиолетового диапазона, но такие портреты получаются только со спутников: до поверхности Земли излучение длиной волны менее 300 нм не доходит. В белом свете Солнце кажется спокойным, но в линии излучения ионизованного железа та же самая поверхность выглядит совсем по-другому. На синтетическом портрете, сложенном из нескольких спектральных линий, многое можно увидеть одновременно: тут и активные области, и выбросы-протуберанцы, и потоки газа в солнечной короне, и отдельные яркие точки, которых раньше не замечали вообще (рис. 10.17). Такие снимки рассказывают нам о том, как функционирует эта звезда на поверхности.

Особенно интересно получается, если делать снимки непрерывно и потом складывать из отдельных кадров «мувики». Так, один из старейших орбитальных телескопов, SOHO, уже 20 лет летает в космосе и несколько раз в час фотографирует Солнце через фильтр, пропускающий линии излучения водорода. Просматривая серии таких снимков, мы видим вспышки и протуберанцы в развитии, а так-

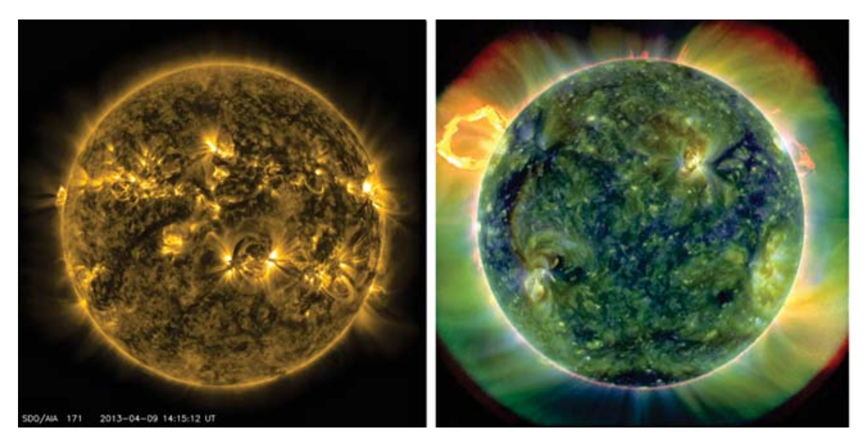



**Рис. 10.17.** ***Слева:*** **Солнце 9 апреля 2013 г. в линии восьмикратно ионизованного железа Fe IX (17,1 нм).** ***Справа:*** **Солнце 30 марта 2010 г. в линиях He II (30,4 нм) и высокоионизованного железа. Фото: Solar Dynamics Observatory, NASA.**

же вращение звезды. Солнце вращается не особенно быстро: примерно за 27 суток оно делает один оборот вокруг своей оси. Но есть звезды, которые оборачиваются за несколько часов. Причина медленного вращения Солнца в том, что в процессе формирования нашей Солнечной системы планеты «отобрали» у своей звезды момент

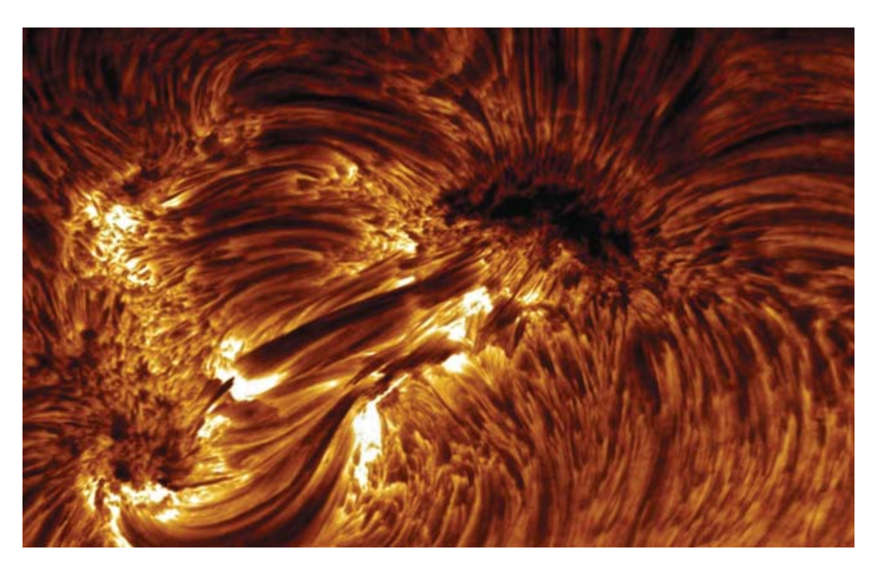


**Рис. 10.18. Структура магнитного поля Солнца в области солнечного пятна детально «обрисована» потоками ионизованного газа.**

импульса, так что полный момент Солнечной системы в основном принадлежит планетам и складывается из их орбитального движения, прежде всего движения массивного Юпитера. Поэтому если мы видим, что какая-то звезда быстро вращается, то планет у нее, скорее всего, нет.

Детальный снимок окрестности солнечного пятна, сделанный в области одной спектральной линии ионизованного железа, хорошо показывает структуру магнитного поля (рис. 10.18). Насыпанные на картонку железные опилки при поднесении снизу магнита выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля — точно так же ориентируются и потоки плазмы вокруг пятен, представляющих собой магнитные полюсы. Таким образом, мы можем непосредственно изучать магнитные поля и поведение газа в этих магнитных полях. Поля там неслабые, порядка тысячи гауссов. В принципе такую напряженность можно получить и на Земле, но это нелегко. А тут у нас, можно сказать, бесплатная физическая лаборатория, в которой можно наблюдать и изучать магнитную газодинамику.

Как правило, протуберанцы спокойные. Они приподнимаются магнитным полем, еще немного свет на них давит снизу, т. е. получается магнитная ловушка, в которой висит плазменное облако; оно остывает — и тогда мы его видим. Иногда газ все-таки покидает поверхность Солнца, и его потоки устремляются из фотосферы в более

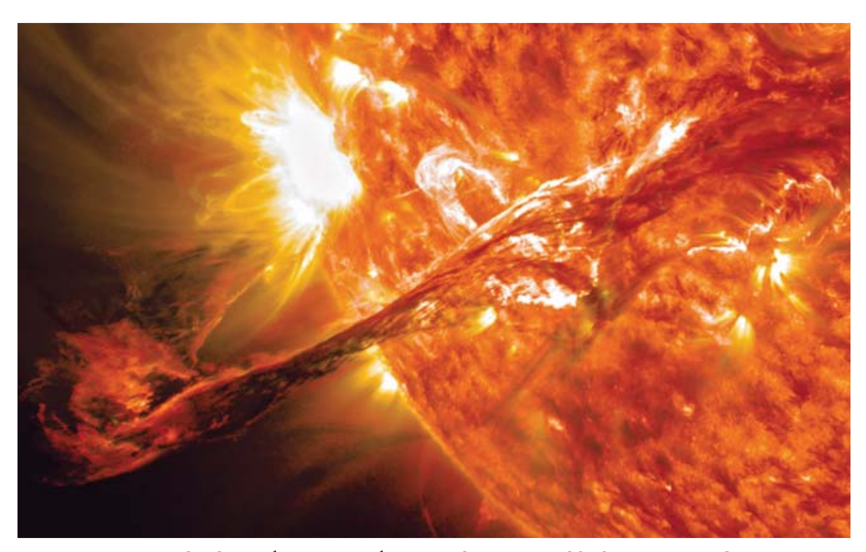


**Рис. 10.19.** Выброс протуберанца 3 февраля 2016 г. Фото: NASA.




**Рис. 10.20.** Солнечная корона, сфотографированная во время полных солнечных затмений 2015 г. *(слева)* и 2012 г. Фото: Милослав Друкмюллер (Miloslav Druckmüller).

высокие слои атмосферы — хромосферу и корону. Корону мы видим редко, потому что она хоть и очень горячая, более миллиона градусов, но очень разрежена и поэтому света дает мало. Только во время солнечного затмения, когда солнечный диск закрыт Луной, мы замечаем, что у Солнца атмосфера очень протяженная и динамично меняющаяся: потоки газа вырываются из нее довольно интенсивно. На хороших снимках солнечного затмения мы прослеживаем корону очень далеко, и она каждый раз разная, потому что меняется активность в разных областях Солнца.

А теперь сопоставьте известные вам данные: поверхность Солнца нагрета всего до 5–6 тысяч градусов, но отходим дальше в холодный космос — и вдруг миллионы градусов. Странная картина, правда? Вроде бы тепло течет от нагревателя к холодильнику, а поверхность Солн-

**Рис. 10.21.** В фотосфере Солнца постоянно происходят «нановспышки» с относительно небольшим выделением энергии, около 240 Мт ТНТ. Они существенно подогревают солнечную корону.

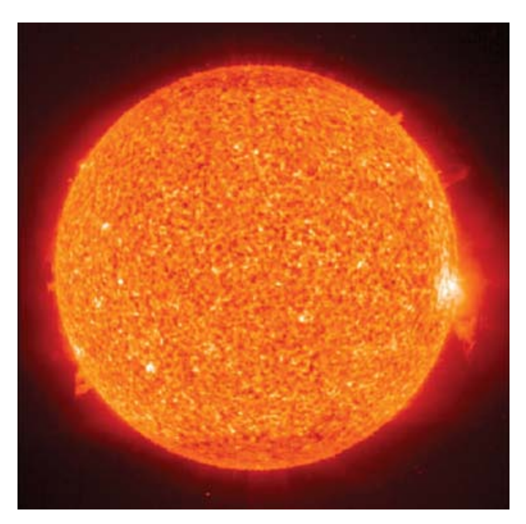




**Рис. 10.22.** Протуберанцы на Солнце. Фото: NASA, 2010 г.

ца — это и есть холодильник по сравнению с ядром. Что приносит туда энергию, что нагревает корону?

До сих пор выдвигали разные гипотезы для объяснения необычно высокой температуры газа в короне — и звуковые волны, и магнитные. Лишь недавно астрофизики поняли, откуда у короны такая высокая температура: причиной являются микровспышки на поверхности Солнца, малюсенькие яркие точки в области контакта между всплывающими в виде гранул потоками газа (рис. 10.21). Но «микро-» такая вспышка лишь в масштабе всего Солнца, а абсолютная величина энергии каждой вспышки — порядка сотни мегатонн тринитротолуола (ТНТ). Для сравнения: энергия взрыва самой мощной бомбы за всю историю человечества (водородной) — 50 мегатонн (это была наша бомба, отечественная). А тут — сотни мегатонн, тем не менее мы их называем «нановспышками», потому что на Солнце они почти не заметны.

Вспышка выглядит так: магнитные поля сжимают плазму, от этого она за короткое время сильно разогревается. По сути, происходит взрыв магнитной бомбы, на поверхности Солнца возникает возмущение, от которого расходятся тяжелые (иногда физики говорят — гра-

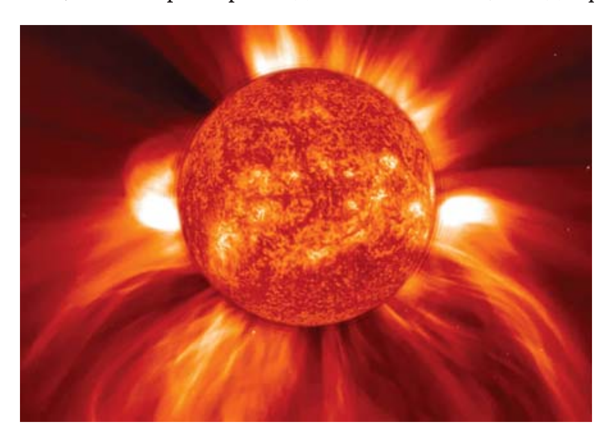


**Рис.10.23.** Корональный выброс массы на Солнце 8 января 2002 г. Фото космической обсерватории SOHO (NASA, ESA).

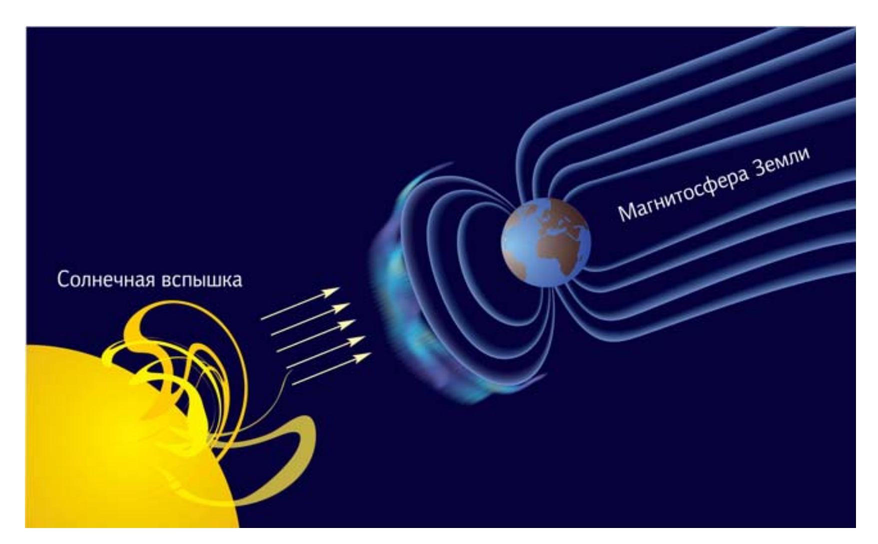



**Рис. 10.24.** Схема образования полярного сияния.

витационные) волны, подобные волнам на поверхности воды. Вспышка как бы стукнула по поверхности — и пошла волна, типичное цунами. В каждой такой вспышке выделяется достаточно энергии, чтобы нагреть большой кусок плазмы и выбросить его с поверхности. Не обязательно насовсем: он может взлететь и потом упасть — ведь от



**Рис. 10.25.** Фото полярного сияния, сделанное астронавтом ЕКА А. Герстом с борта Международной космической станции. Источник: ESA/NASA.

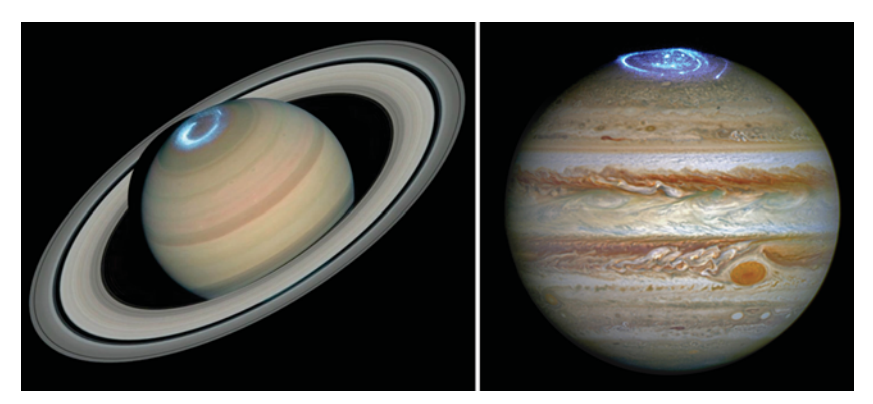


**Рис. 10.26.** **Полярное сияние на Сатурне и Юпитере. Здесь ультрафиолетовые снимки полярных сияний совмещены с оптическими снимками планет. Фото: «Хаббл», NASA.**

Солнца оторваться нелегко (рис. 10.22). Бывает, что облако выбрасывается со второй космической скоростью — это называют *корональными выбросами массы,* — и вещество летит в разные стороны. Если комета сталкивается с таким выбросом, у нее может оторвать хвост. Правда, тут же вырастет новый, как у ящерицы, потому что ядро кометы постоянно испаряется.

Налетают солнечные выбросы и на Землю. Когда такое плазменное облако обрушивается на нашу атмосферу, мы наблюдаем полярное сияние (рис. 10.25). Для нас эти события важны, поэтому за солнечными чудесами сегодня следит множество спутников. Полярное сияние также возникает и на Юпитере, и на Сатурне (рис. 10.26), и даже на Уране.



# 11 Звездный свет

Звезды — это, пожалуй, самое интересное, что есть в астрономии. Кроме того, их внутреннее строение и эволюцию мы понимаем лучше, чем что-либо в космосе (во всяком случае, нам так кажется). С планетами дело обстоит не очень хорошо, потому что их внутренности очень трудно исследовать — мы видим только то, что на поверхности. А что касается звезд, то большинство из нас уверены, что они устроены просто.

В начале прошлого века один молодой астрофизик высказался на семинаре у Эддингтона в том духе, что проще звезд ничего нет. На что более опытный астрофизик ответил: «Ну да, если вас рассматривать с расстояния в миллиарды километров, то вы тоже покажетесь простым». На самом деле звезды не так просты, как кажется. Но все-таки их свойства исследованы наиболее полно. Тому есть две причины. Во-первых, мы умеем численно моделировать звезды, потому что, как нам представляется, они сделаны из идеального газа. Точнее, из плазмы, которая ведет себя как идеальный газ с простым уравнением состояния (это связь между температурой, плотностью и давлением). Планеты же намного сложнее. Во-вторых, иногда нам удается заглянуть в недра звезд, хотя пока это касается в основном Солнца.

К счастью, у нас в стране было и остается много хороших астрофизиков, специалистов по звездам. Связано это в основном с тем, что были хорошие физики, которые делали ядерное оружие, а звезды представляют собой природные ядерные реакторы. И когда оружие было сделано, многие физики переключились на исследование звезд, потому что это объекты в чем-то подобные. И они написали хорошие книги на эту тему.

Посоветую вам две книжки, которые до сих пор, на мой взгляд, остаются лучшими из книг на русском языке. «Физика звезд», автор которой — известный физик и талантливый преподаватель Самуил Аронович Каплан, написана почти сорок лет назад, но основы с тех пор не изменились. А современные сведения о физике звезд вы най-

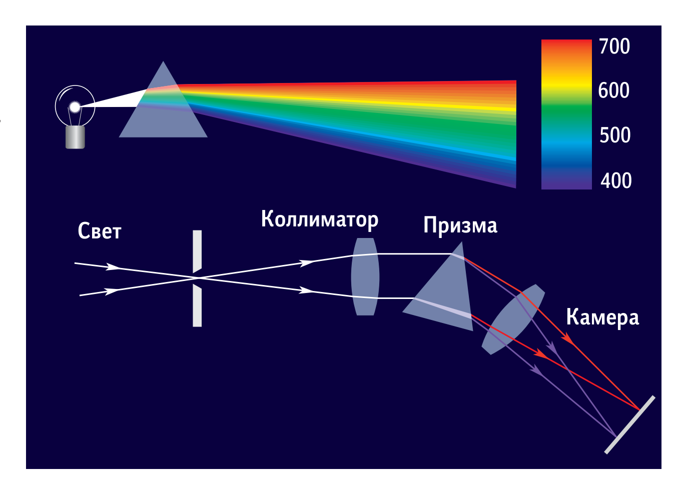



дете в книге «Звезды» из серии «Астрономия и астрофизика», которую сделали мы с коллегами. Она пользуется таким интересом у читателей, что вышла уже тремя изданиями. Есть и другие книги, но в этих двух содержится практически исчерпывающая информация для тех, кто знакомится с предметом.

### Такие разные звезды

Если мы посмотрим на звездное небо, то заметим, что звезды имеют разную яркость (видимый блеск) и разный цвет. Понятно, что блеск может быть делом случая, поскольку одна звезда ближе, другая — дальше, и по нему трудно сказать, какова звезда на самом деле. А вот цвет рассказывает нам о многом, потому что чем выше температура тела, тем дальше в голубую область сдвигается максимум в спектре излучения. Казалось бы, мы можем просто на глаз оценить температуру звезды: красная — холодная, голубая — горячая. Как правило, это действительно так и есть. Но иногда возникают и ошибки, связанные с тем, что между звездой и нами есть какая-то среда. Иногда она очень прозрачна, а иногда не очень. Всем известен пример с Солнцем: высоко над горизонтом оно белое (мы его называем желтым, но для глаза оно почти белое, потому что его свет нас

**Рис. 11.1.** Принципиальная схема прибора для спектрального анализа.




ослепляет), но Солнце краснеет, когда восходит или заходит за горизонт. Очевидно, что не у самого Солнца меняется температура поверхности, а среда изменяет видимый цвет, и об этом надо помнить. К сожалению, для астрономов это большая проблема — угадать, насколько изменился цвет, т. е. видимая (цветовая) температура звезды, за счет того, что ее свет прошел сквозь межзвездный газ, атмосферу нашей планеты и прочие поглощающие среды. Спектр звездного света — характеристика намного более надежная, потому что его трудно сильно исказить. Всё, что мы знаем сегодня о звездах, мы прочитали в их спектрах. Исследование звездного спектра — это огромная, тщательно разработанная область астрофизики.

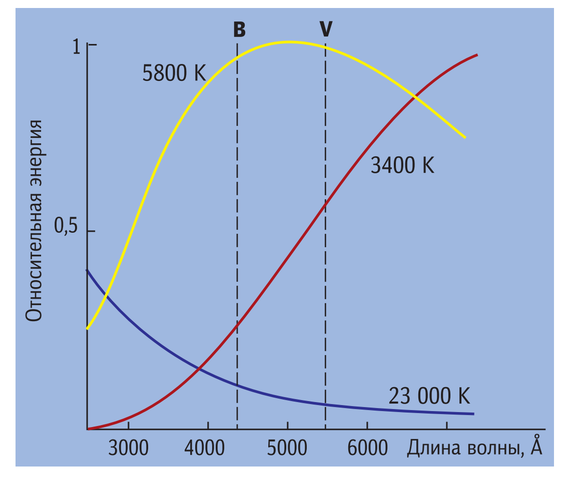



**Рис. 11.2.** Спектр абсолютно черного тела при разных температурах. Указано положение центров полос пропускания фильтров B и V. Ширина полос — около 1000 Å.

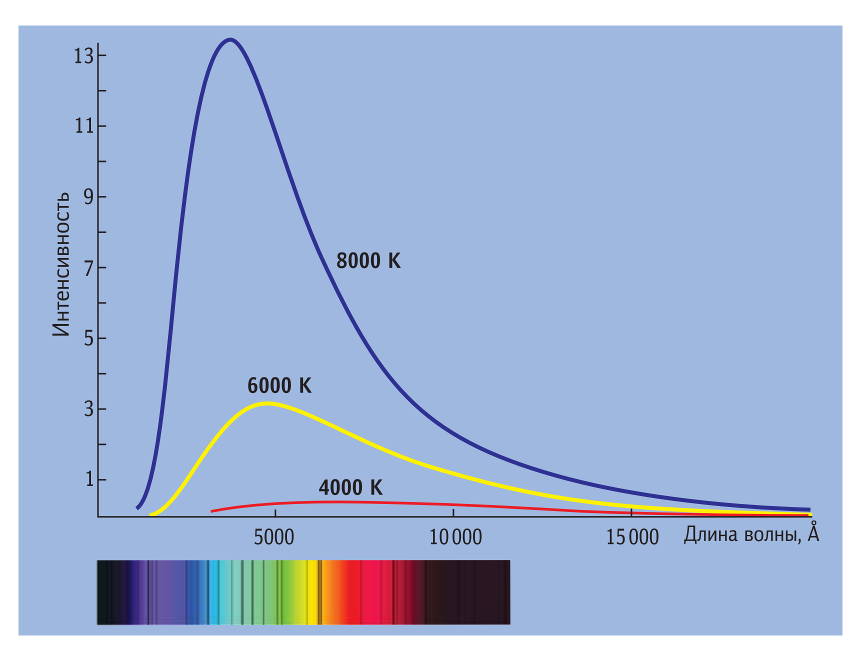



**Рис. 11.3. Распределение энергии в спектре звезды. Показаны центры полос пропускания светофильтров B и V на фоне спектров излучения Солнца.**

Интересно, что менее двухсот лет назад известный философ Огюст Конт сказал: «Мы уже многое узнали о природе, но есть такое, что мы не узнаем никогда, — это химический состав звезд, потому что их вещество никогда не попадет к нам в руки». Действительно, в руки к нам оно вряд ли когда-нибудь попадет, но прошло буквально 15–20 лет, и люди изобрели спектральный анализ, благодаря которому о химическом составе как минимум поверхности звезд мы узнали практически всё. Так что никогда не говори «никогда». Напротив, всегда найдется способ сделать то, во что ты поначалу не веришь.

Но прежде чем говорить о спектре, посмотрим еще раз на цвет звезды. Мы уже знаем, что максимум в спектре с увеличением температуры смещается в голубую область (рис 11.3), и это надо использовать. И астрономы научились это использовать, потому что снять полный спектр — дело очень затратное. Нужны большой телескоп и длительное время наблюдения, чтобы накопить достаточно света на разных длинах волн — и при этом получить результат лишь для одной исследуемой звезды. А цвет можно измерять очень просто, причем для многих звезд одновременно. И для массового статистическо-

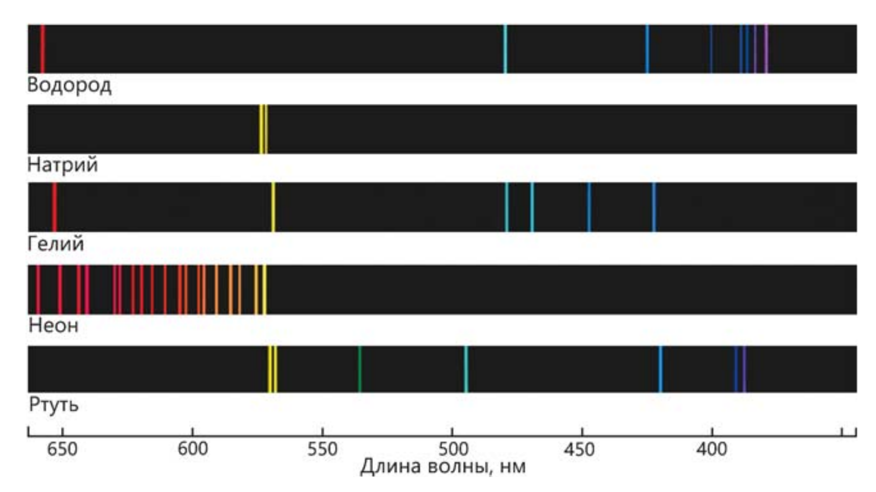



**Рис. 11.4.** Спектры химических элементов в видимой области.

го анализа мы просто фотографируем их два-три раза через разные светофильтры с широким *окном пропускания*. Обычно двух фильтров — Blue (B) и Visual (V) — уже достаточно, чтобы в первом приближении определить температуру поверхности звезды. Например, есть три звезды, у которых разные температуры поверхности и разный цвет. Если одна из них — типа Солнца (температура около 6000 K), то на обоих снимках она будет примерно одинаковой яркости, но свет более холодной звезды станет сильнее гаситься B-фильтром, сквозь него будет проходить мало длинноволнового излучения, поэтому она будет казаться нам «слабенькой» звездочкой. А с более горячей звездой дело будет обстоять прямо противоположным образом.

Но бывает мало двух фильтров: всегда можно ошибиться, как с Солнцем на горизонте. Поэтому помимо окон пропускания Visual и Blue астрономы обычно используют и третье — Ultraviolet, на границе прозрачности атмосферы. Три снимка уже вполне точно говорят о том, в какой мере межзвездная среда ослабляет свет каждой звезды и какова собственная температура поверхности звезды. Для массовой классификации звезд такая трехполосная фотометрия — пока единственный способ, позволивший изучить более миллиарда звезд.

### Вселенская паспортизация звезд

Спектр, конечно, гораздо полнее характеризует звезду. Он представляет собой «паспорт» звезды, потому что спектральные линии говорят нам об очень многом. К словам «спектральные линии» мы

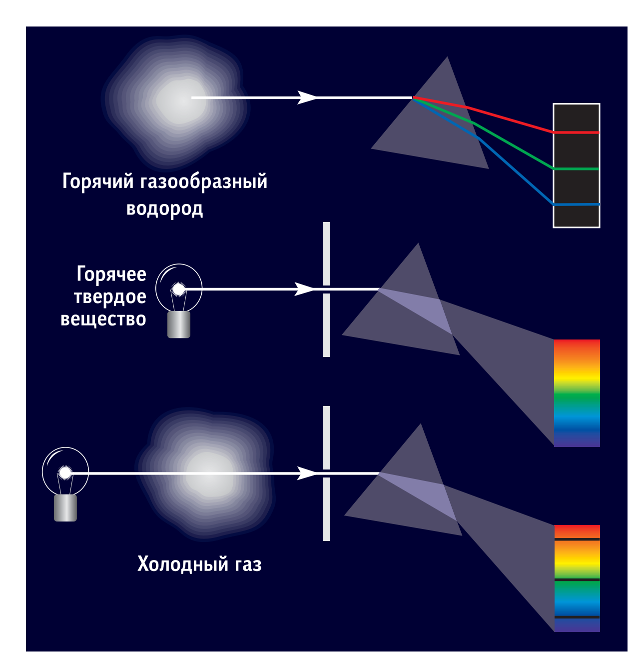



**Рис. 11.5.** Горячий газ испускает лучи с дискретным спектром, электропроводящий материал генерирует сплошной спектр.

все привыкли, представляем, что это такое. По горизонтальной оси — длина волны, связанная с тем, на какой частоте излучается свет. Но каково происхождение формы линий, почему они выглядят как прямые вертикальные черточки, а не кружочки, треугольники или какие-нибудь загогулинки? Спектральная линия — это монохроматическое изображение входной щели спектрографа. Если сделать щель в виде крестика, то получится набор крестиков разного цвета. О таких простых вещах студент-физик, по-моему, должен задумываться. Или, как в армии, сказали «линия» — значит линия? Отнюдь не всегда это линия, потому что в спектрографе не обязательно используется входная щель, хотя, как правило, входное отверстие — это вертикальная прямоугольная щель, так удобнее.

В схеме любого спектрографа всегда есть диспергирующий элемент: в этом качестве может выступать призма или дифракционная решетка. Звезда — облачко горячего газа — испускает характерный набор квантов разных частот. Мы пропускаем их через входную щель и диспергирующий элемент и получаем изображения щели в разных цветах, упорядоченно расположенные по длине волны (рис. 11.5).

Если излучают свободные атомы химических элементов, то спектр получается линейчатым. А если взять в качестве источни-

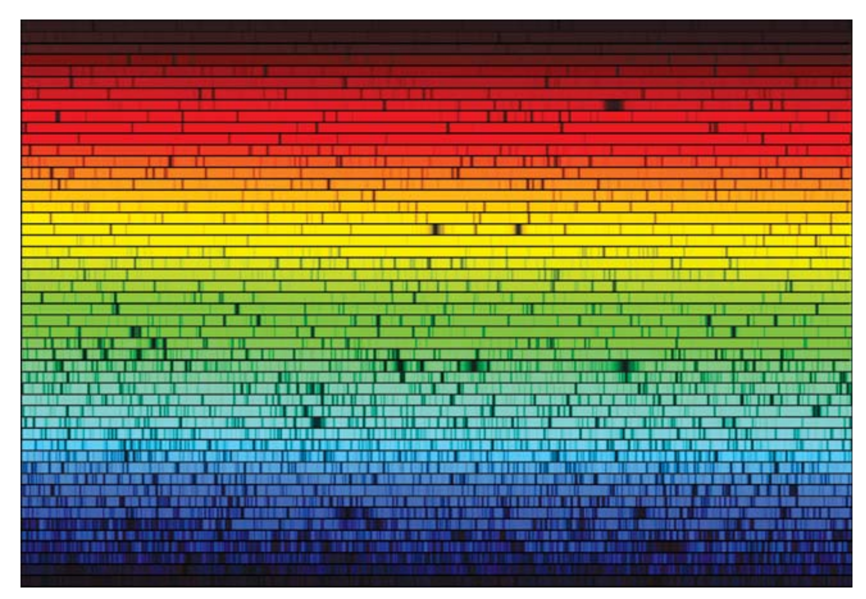


**Рис. 11.6.** Спектр Солнца или яркой звезды для детального исследования можно сильно растянуть, нарезать на кусочки и сложить стопкой от красного конца к синему. Технически это делается с помощью двух скрещенных дифракционных решеток: одна создает спектр с высокой дисперсией, соседние порядки которого частично накладываются друг на друга, а вторая раздвигает их в перпендикулярном направлении.

ка излучения горячую спираль лампы накаливания, то получится спектр непрерывный. Почему так? В металлическом проводнике нет характерных уровней энергии, там электроны, бешено двигаясь, излучают на всех частотах. Поэтому спектральных линий так много, что они перекрываются друг с другом и получается *континуум* — непрерывный спектр.

А теперь берем источник непрерывного спектра и пропускаем его свет через облачко газа, но более холодного, чем спираль. В этом случае облачко выхватывает из непрерывного спектра те фотоны, энергия которых соответствует переходам между энергетическими уровнями в атомах газа. И на этих частотах мы получаем в сплошном спектре вырезанные линии, «дырочки», — получается спектр поглощения. Но атомы, которые поглотили световые кванты, стали менее устойчивыми и рано или поздно их излучают. Почему же спектр продолжает оставаться «дырявым»? Потому что атому все равно, куда выбрасывать «лишнюю» энергию. Происходит спонтанное излучение в разных направлениях. Некоторая доля фотонов летит, ко-

нечно же, и вперед, но, в отличие от вынужденного излучения лазера, она мизерная.

Спектральные линии обычно весьма широкие, и распределение яркости внутри них неравномерное. Это обстоятельство тоже заслуживает внимания. Есть много физических факторов, делающих спектральную линию широкой. На графике распределения яркости (или поглощения) обычно можно выделить два параметра: центральный максимум и характерную ширину. Ширину спектральной линии принято измерять на уровне половины интенсивности максимума. И ширина, и форма линии могут рассказать нам о каких-то физических особенностях источника света. Но о каких?

Предположим, мы подвесили одиночный атом в вакууме и никак не трогаем его, не мешаем ему излучать. Но даже в этом случае в спектре будет ненулевая ширина линий — ее называют естественной. Она возникает из-за того, что процесс излучения ограничен во времени, у разных атомов он составляет от $10^{-8}$ до $10^{-10}$ с. Если вы «обрежете» на концах синусоиду электромагнитной волны, то это уже будет не синусоида, а кривая, раскладывающаяся в набор синусоид с непрерывным спектром частот. И чем короче время излучения, тем шире спектральная линия.

В природных источниках света есть и другие эффекты, которые уширяют спектральную линию. Например, тепловое движение атомов. Поскольку излучающий объект имеет ненулевую абсолютную температуру, его атомы хаотически движутся: половина — к нам, половина — от нас, если рассматривать лучевую проекцию скорости. В результате эффекта Доплера излучение первых сдвигается в синюю сторону, вторых — в красную. Это явление называется *доплеровским тепловым уширением* спектральной линии.

Доплеровское уширение может происходить и по другим причинам, например в результате макроскопического движения вещества. Поверхность любой звезды «кипит»: конвективные потоки горячего газа поднимаются из глубин, остывшего — опускаются. Одни потоки в момент снятия спектра движутся к нам, другие — от нас. Конвективный эффект Доплера иногда бывает более сильным, чем тепловой.

Когда мы смотрим на фотографию звездного неба, нам трудно понять, какова величина звезд на самом деле. Например, есть красная и голубая. Если бы я ничего не знал о них, я бы мог подумать так: у красной звезды не очень высокая температура поверхности, но, если я вижу ее довольно яркой, она расположена близко ко мне. Но

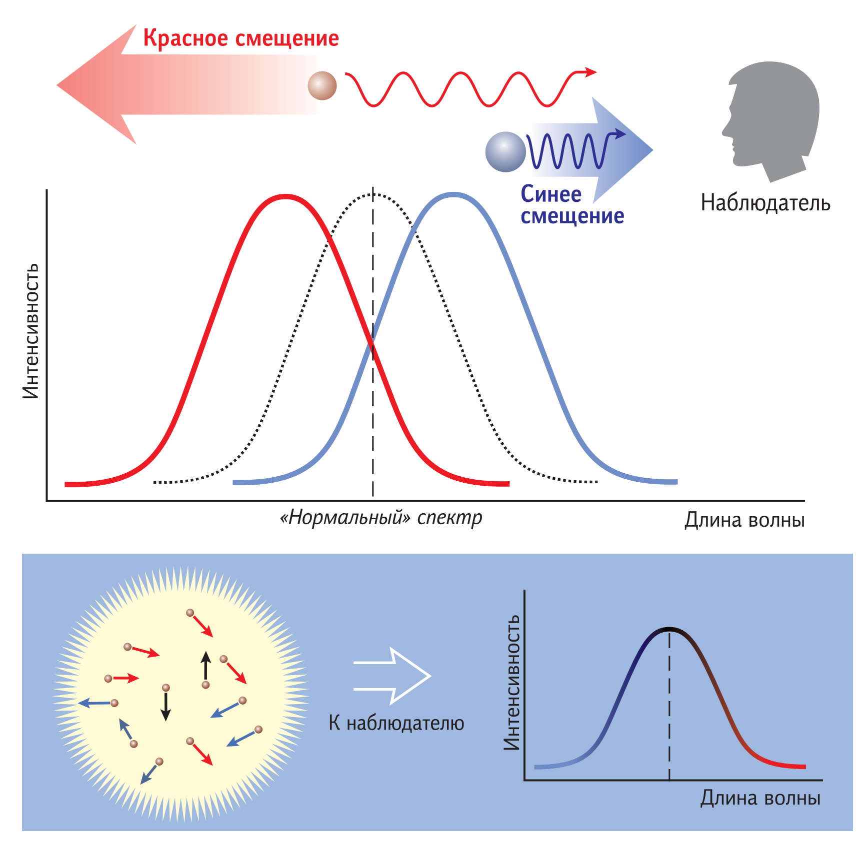



**Рис. 11.7.** **Схема формирования красного и синего смещения при движении источников волн и механизм теплового уширения спектральных линий.**

тогда с определением относительной дальности до голубой звезды, которая светит слабее, у меня возникнет проблема. Я размышляю: голубая — значит горячая, но мне не понять, близко или далеко она от меня. Ведь она может быть большого размера и излучать большую мощность, но находиться столь далеко, что света оттуда приходит мало. Или же, напротив, она может светиться так слабо потому, что очень маленькая, хотя и близкая. Как же отличить большую звезду от маленькой? Можно ли по спектру звезды определить ее линейный размер? Казалось бы, нет.

Тем не менее это возможно! Дело в том, что маленькие звезды — плотные, а у больших атмосфера разрежена, поэтому газ в их атмосферах находится в разных условиях. Когда мы получаем спектры так называемых звезд-карликов и звезд-гигантов, то сразу же видим

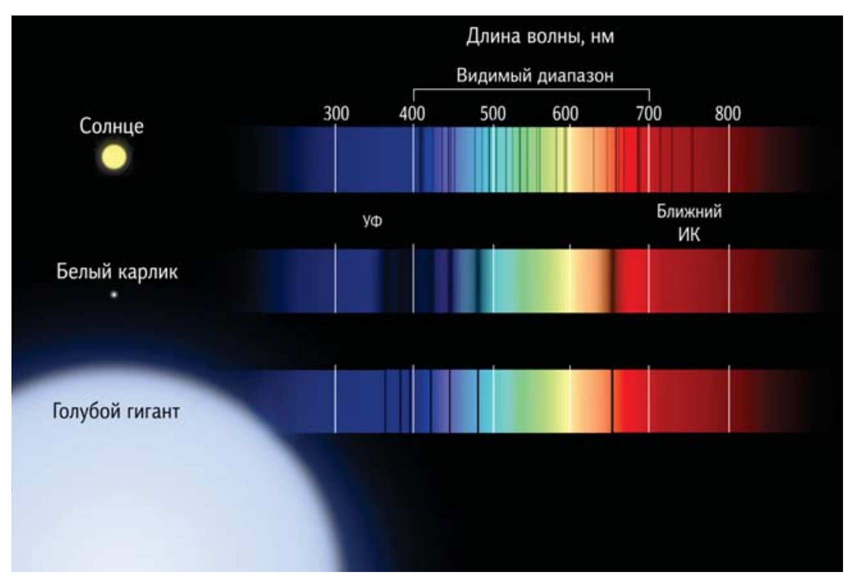



**Рис. 11.8.** **Спектры звезд-карликов и звезд-гигантов различаются шириной линий.**

различия в характере спектральных линий (рис. 11.8). В разреженной атмосфере гиганта каждый атом летает свободно, редко встречая соседей. Излучают все они практически одинаково, поскольку не мешают друг другу, так что спектральные линии гигантов имеют ширину, близкую к естественной. А вот карлик — звезда массивная, но очень маленькая и, значит, с очень высокой плотностью газа. В ее атмосфере атомы постоянно взаимодействуют друг с другом, мешая соседям излучать на строго определенной частоте, потому что у каждого атома есть свое электрическое поле, которое влияет на поле соседа. Из-за того, что атомы находятся в разных условиях окружения, происходит так называемое *штарковское уширение* линии, т. е. по форме, как говорят, «крыльев» спектральных линий мы сразу угадываем плотность газа на поверхности звезды и ее типичный размер.

Доплеровский эффект может проявляться и из-за вращения звезды в целом. Мы не можем различить края удаленной звезды, она для нас выглядит как точка, но от приближающегося к нам края все линии спектра испытывают голубое смещение, от удаляющегося от нас — красное (рис. 11.9). В сумме это приводит к уширению спектральной линии. Оно выглядит не так, как эффект Штарка, по-другому меняет форму спектральной линии, поэтому можно понять, в ка-

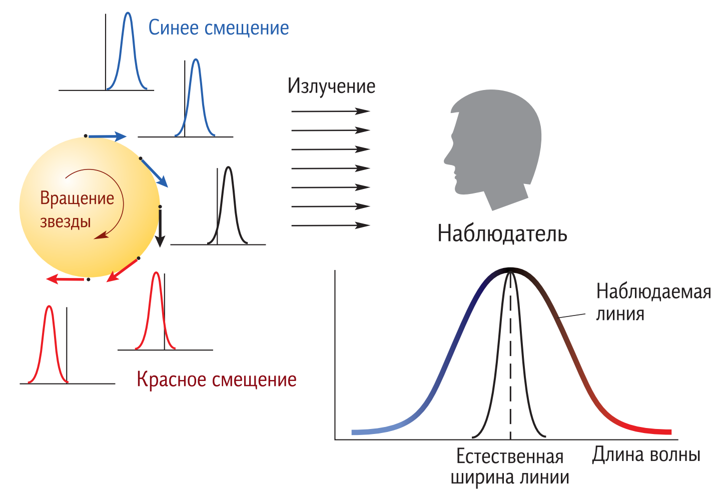



**Рис. 11.9.** Вращение звезды приводит к уширению спектральных линий.

ком случае на ширину линии повлияло вращение звезды, а в каком — плотность газа в ее атмосфере. Фактически это единственный способ измерения скорости вращения звезды, потому что звезд в виде шариков мы не видим, все они для нас — точки.

Движение звезды в пространстве тоже влияет на спектр из-за эффекта Доплера. Если две звезды движутся вокруг друг друга, оба их спектра смешиваются и ходят один на фоне другого, т. е. периодическое смещение линий туда-сюда — признак орбитального движения звезд.

А что мы можем получить из серии меняющихся во времени спектров? Мы измеряем скорость (по амплитуде смещения), орбитальный период, а по этим двум параметрам, пользуясь третьим законом Кеплера, рассчитываем суммарную массу звезд. Иногда по косвенным признакам удается разделить эту массу между компонентами двойной системы. В большинстве случаев это единственный способ измерить массу звезд.

Кстати, диапазон масс звезд, которые изучены на сегодняшний день, не очень велик: разница составляет немногим больше 3 порядков величины. Наименее массивные звезды — порядка 0,1 массы Солнца: меньшая масса не позволяет потенциальной звезде запустить термоядерные реакции. Наиболее массивные звезды, которые мы недавно обнаружили, имеют массу в 150 солнечных. Это уникумы, таких известно пока только две из нескольких миллиардов.

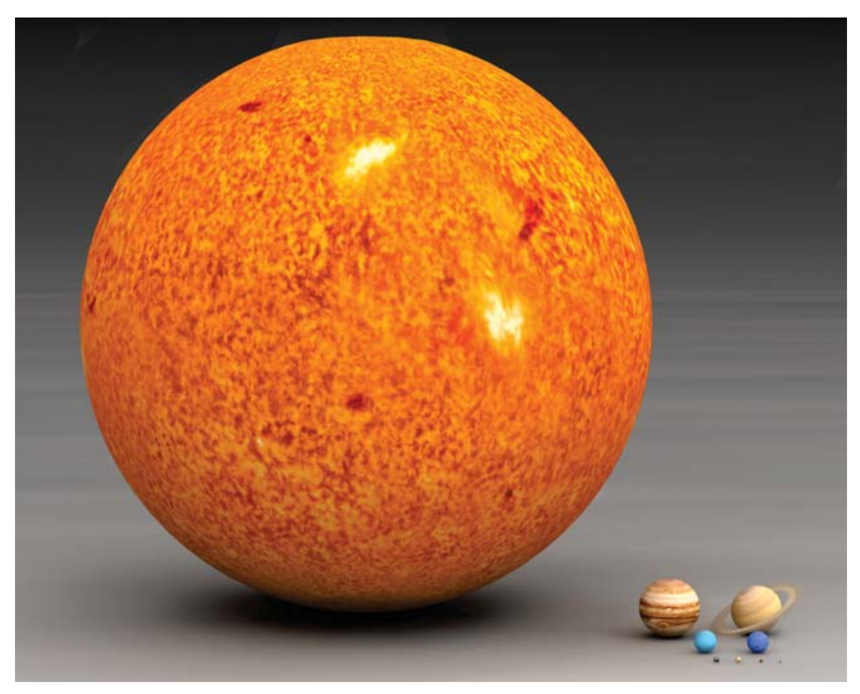


**Рис. 11.10.** Модель Солнца и планет, демонстрирующая соотношение их размеров.

Наблюдая редкие двойные системы, в орбитальной плоскости которых мы находимся, мы тоже можем многое узнать о паре звезд, используя только наблюдательные характеристики, т. е. то, что можем непосредственно увидеть, а не рассчитать на основе каких-то законов. Поскольку мы не различаем их поодиночке, мы видим просто источник света, блеск которого время от времени меняется: происходят затмения, пока одна звезда проходит на фоне другой (рис. 11.11). Более глубокое затмение означает, что холодная звезда закрыла собой горячую, а менее глубокое — наоборот, горячая закрыла собой

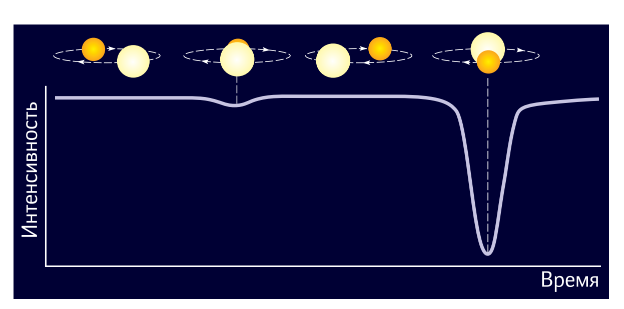



**Рис. 11.11.** Периодическое изменение блеска звезды — признак затмений в двойной системе.

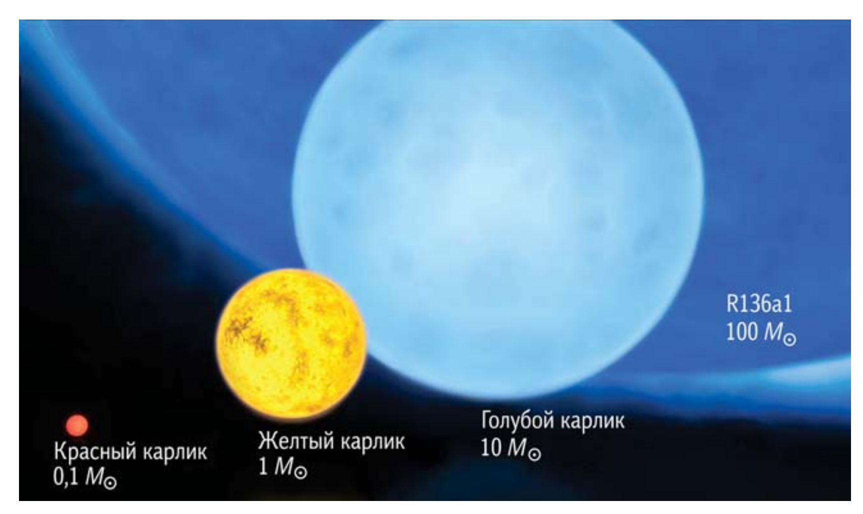



**Рис. 11.12.** Есть звезды намного меньше и намного крупнее Солнца.

холодную (закрытые площади одинаковы, поэтому глубина затмения зависит только от их температуры). Помимо орбитального периода мы измеряем светимость звезд, из которой определяем их относительную температуру, а по длительности затмения рассчитываем размер.

Размер звезд, как мы знаем, огромен. По сравнению с планетами они просто гигантские. Солнце — наиболее типичная по размеру звезда, наравне с такими давно известными, как Альфа Кентавра и Сириус. Есть звезды заметно меньше их, одна из самых мелких (и од-

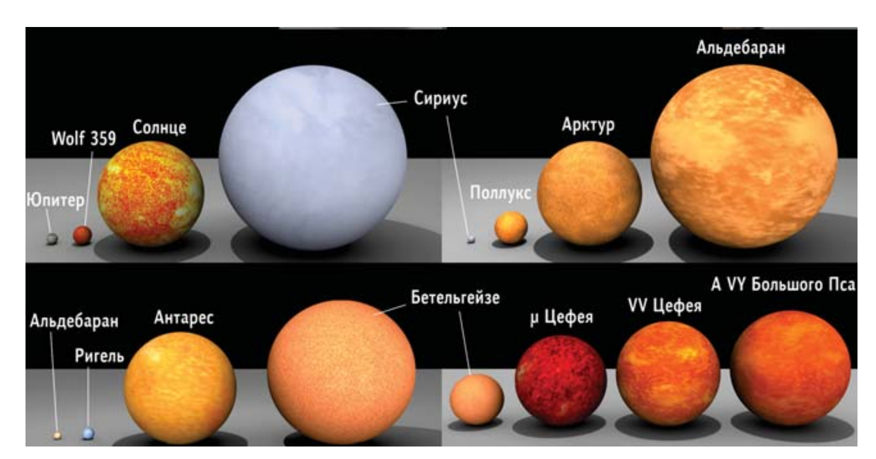



**Рис. 11.13.** Относительный размер ближайших звезд и Юпитера.

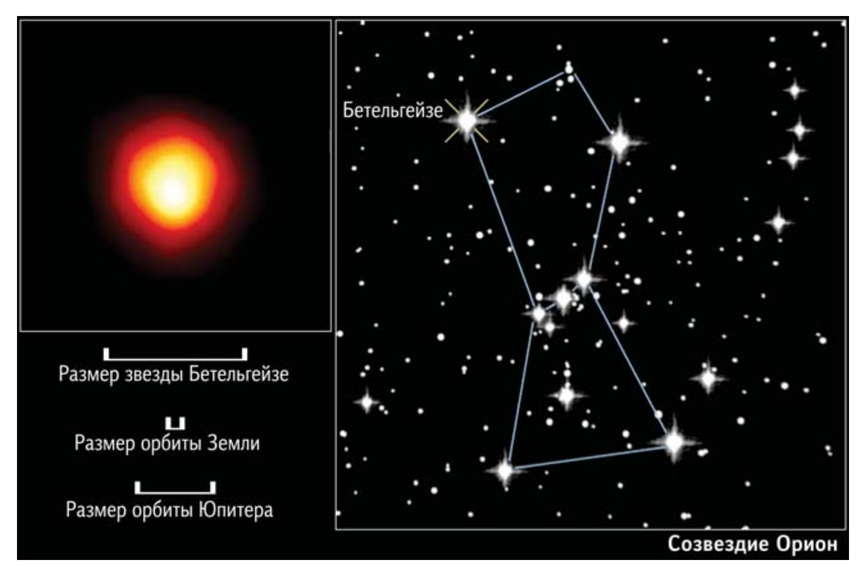



**Рис. 11.14. Размер звезды Бетельгейзе в сравнении с диаметрами орбиты Земли и Юпитера. Фото космического телескопа «Хаббл».**

новременно одна из самых близких к нам) — Проксима, она чуть больше Юпитера. А есть звезды намного крупнее, причем на некоторых стадиях эволюции они раздуваются до невероятных размеров и становятся заметно больше всей нашей планетной системы. В целом размеры звезд (в отличие от их масс) укладываются в огромный диапазон — 7 порядков величины.

Пожалуй, единственная звезда, диаметр которой мы измерили напрямую (благодаря тому, что она недалеко от нас), — это сверхгигант Бетельгейзе в созвездии Орион: на снимках телескопа «Хаббл» она — не точка, а кружок (рис. 11.14). Если эту звезду поставить на место Солнца, она «съест» не только Землю, но и Юпитер, полностью накроет его орбиту.

Но что мы вообще называем размером звезды? Между какими точками мы ее измеряем? На оптических снимках звезда четко ограничена в пространстве, и кажется, что вокруг ничего нет. Значит, сфотографировали Бетельгейзе в видимом свете, приложили линейку к изображению — и готово? Но это, оказывается, еще не всё. В дальнем инфракрасном диапазоне излучения (рис. 11.15) видно, что атмосфера звезды тянется гораздо дальше, испускает из себя потоки. Надо полагать, это и есть граница звезды? Но переходим в ми-

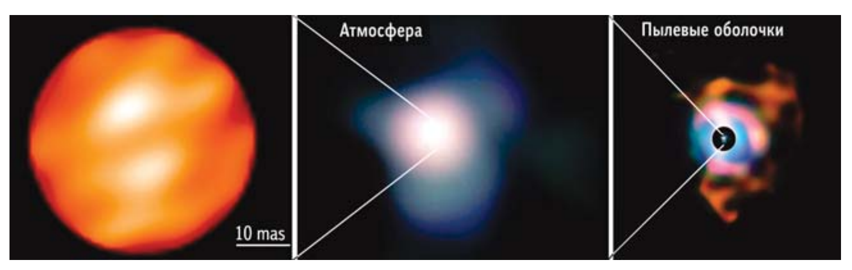



**Рис. 11.15.** Звезда Бетельгейзе выглядит имеющей разные размеры и форму, если фотографировать ее в оптическом, дальнем инфракрасном и микроволновом диапазонах. На правом снимке центр звезды закрыт черным кружком, внутри которого в том же масштабе помещено предыдущее изображение.

кроволновый диапазон — и видим, что атмосфера звезды протянулась почти на тысячу астрономических единиц, она в несколько раз крупнее всей нашей Солнечной системы.

Звезда в общем случае — это газовое образование, которое не замкнуто в жестких стенках (в космосе их нет) и поэтому не имеет границ. Формально любая звезда простирается бесконечно (точнее, пока не достигнет соседней звезды), интенсивно испуская газ, который называют *звездным ветром* (по аналогии с солнечным ветром). Поэтому, говоря о размере звезды, всегда нужно уточнять, в каком диапазоне излучения мы его определяем, тогда будет более понятно, о чем речь.

## Размеры и массы звезд

Диаметр Солнца — 1 392 000 км, что в 109 раз больше диаметра Земли и примерно в 10 раз — диаметра Юпитера. Как видим, наша звезда намного крупнее входящих в ее систему планет. Масса Солнца ($M_\odot$) составляет около $2 \cdot 10^{30}$ кг: оно массивнее Земли в 333 000 раз и Юпитера — в 1000 раз. Размер и массу других звезд обычно выражают в единицах размера и массы Солнца — довольно типичной звезды.

Самые массивные среди известных звезд примерно в 150 раз массивнее Солнца. А вот указать минимальную массу звезды не так просто: для этого нужно решить, как именно провести границу между звездами и планетами. Из теоретических расчетов известно, что масса звезды, светящейся, подобно Солнцу, за счет термоядерных реакций, не может быть меньше 0,07 $M_\odot$. Следовательно, самые массивные звезды всего в 1500 раз «тяжелее» самых маломассивных. Удивительно, что светимости звезд при этом различаются почти в триллион раз!

Размеры звезд различаются не так сильно, но тоже значительно — почти в миллиард раз (если принимать в расчет нейтронные звезды). При этом самые большие звезды — не обязательно самые массивные. Известны звезды, которые больше нашего Солнца по диаметру примерно в 1500 раз, при этом некоторые из них не отличаются существенно от Солнца по массе, а значит, имеют среднюю плотность в миллионы раз меньше, чем Солнце. И это при том, что средняя плотность Солнца не особенно впечатляет: она равна 1,4 т/м$^3$, лишь немногим больше плотности воды.

Самые маленькие в мире звезд — белые карлики и нейтронные звезды. Белые карлики сравнимы по размеру с Землей, но при этом их массы близки к солнечной. Поэтому средняя плотность вещества белого карлика превышает солнечную в десятки миллионов раз. Нейтронные звезды в несколько раз массивнее белых карликов и намного меньше их — всего несколько километров в диаметре, а значит, они еще в миллион раз плотнее (~$10^{14}$ т/м$^3$). Это самые плотные тела, известные человеку.

Точные данные о массах, радиусах и светимости звезд — это фундамент, на котором покоится теория строения и эволюции звезд. К сожалению, астрономы не могут похвастаться высокой точностью определения этих параметров. Для вычисления каждого из них необходимо знать расстояние до звезды, а измерить его с высокой точностью удается лишь для ближайших к Солнцу звезд, среди которых преобладают маломассивные карлики и почти нет гигантов и звезд большой массы. Кроме этого, определить массу звезды возможно лишь в том случае, если она является членом двойной или кратной системы, что еще сильнее сужает круг пригодных для измерения объектов. Но еще труднее измерить размер звезды. Сделать это удается, если в двойной системе звезды затмевают друг друга, сканируя своим диском оказавшегося за ним соседа, но при этом взаимная близость звезд может существенно исказить их эволюцию.

### Гарвардская классификация спектров

Настоящие спектры звезд, несомненно, очень сложны. Они совсем не похожи на спектры отдельных химических элементов, которые мы привыкли видеть в справочниках. Например, даже в узком оптическом диапазоне солнечного спектра — от фиолетовой области до красной, — который наш глаз как раз и видит, линий очень много (рис. 11.16), и разобраться в них совсем не просто. Узнать даже на

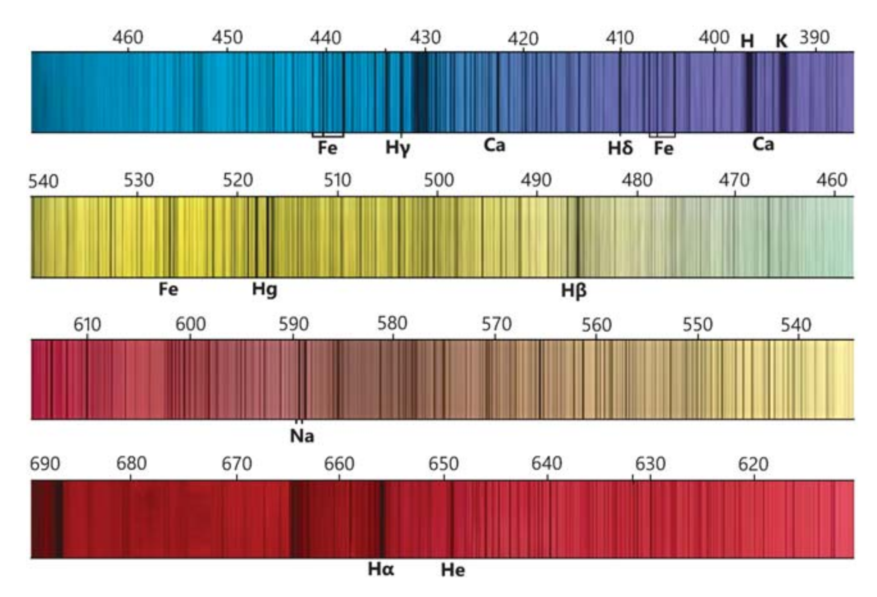



**Рис. 11.16.** **В одном только оптическом диапазоне спектра солнечного света содержатся десятки тысяч линий, по которым можно расшифровать элементный состав солнечной атмосферы.**

основе детального, высокодисперсного спектра, какие химические элементы и в каком количестве присутствуют в атмосфере звезды, — большая проблема, которую астрономы не могут решить до конца.

Глядя на спектр, мы сразу увидим выделяющиеся бальмеровские линии водорода (Hα, Hβ, Hγ, Hδ) и очень много линий железа. Иногда попадаются гелий, кальций. Логично сделать вывод, что звезда состоит в основном из железа (Fe) и отчасти из водорода (H). В начале XX в. была открыта радиоактивность, и когда люди задумались об источниках энергии звезд, они вспомнили, что в спектре Солнца много линий металлов, и предположили, что распад урана или радия греет внутренности нашего Солнца. Однако оказалось, что это не так.

Первая классификация звездных спектров была создана в Гарвардской обсерватории (США) руками примерно дюжины женщин. Кстати, почему именно женщин — вопрос интересный. Обработка спектров — это очень тонкая и кропотливая работа, для выполнения которой директору обсерватории Э. Пикерингу надо было взять помощников. Женский труд в науке тогда не очень приветствовался и оплачивался намного хуже мужского: на те деньги, которые были у этой небольшой обсерватории, можно было нанять либо двух

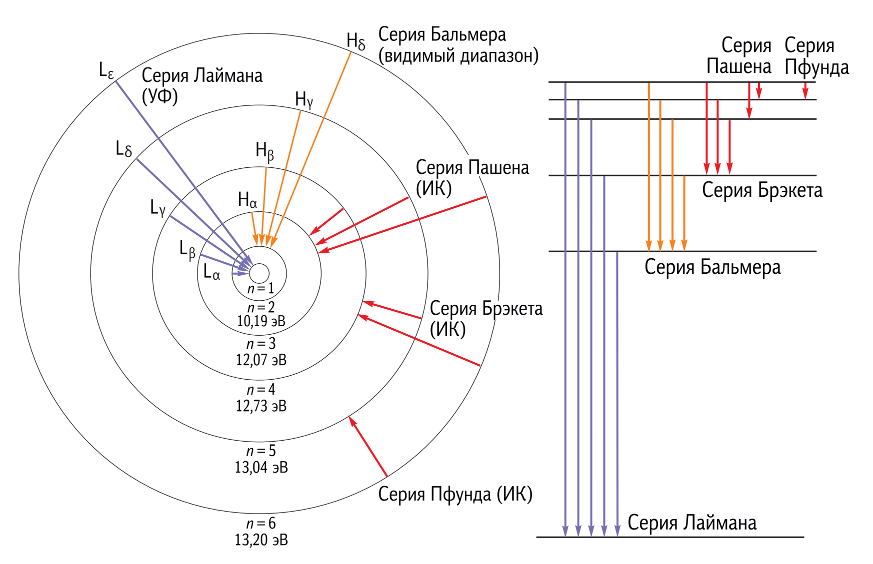



**Рис. 11.17. Схема электронных энергетических уровней атома водорода и переходов между ними.**

мужчин, либо дюжину женщин. И тогда впервые в астрономию было призвано большое количество женщин, которые сформировали так называемый «гарем Пикеринга». Созданная ими спектральная классификация была первым вкладом в науку женского коллектива, который оказался гораздо более эффективным, чем ожидалось.

В то время люди вообще не представляли, на основе каких физических явлений формируется спектр, его просто фотографировали. Пытаясь построить классификацию, астрономы рассуждали так: в спектре любой звезды есть линии водорода, по убыванию их интенсивности можно упорядочить все спектры и сгруппировать их. Группы спектров обозначили латинскими буквами по алфавиту: с самыми сильными линиями — класс A, слабее — класс B и т. д.

Вроде бы все было сделано правильно. Но через несколько лет родилась квантовая механика, и мы поняли, что вовсе не обязательно, чтобы обильный элемент был представлен в спектре мощными линиями, а редкий элемент никак себя не проявлял. Многое зависит от температуры.

Давайте посмотрим на спектр поглощения атомарного водорода: в оптический диапазон попадают линии только бальмеровской серии. Но как эти кванты поглощаются? При переходах только со второго уровня вверх. Но в нормальном (холодном) состоянии все элек-

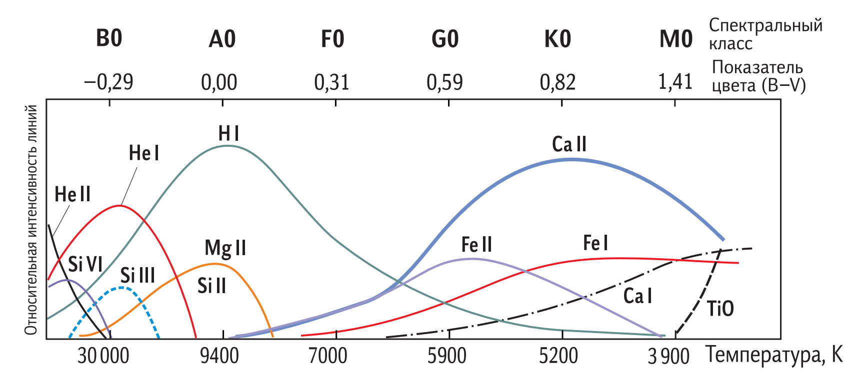



**Рис. 11.18.** **Для каждой спектральной линии существует температура, при которой она имеет наибольшую интенсивность.**

троны «сидят» на первом уровне, а на втором почти ничего нет. Значит, нам надо нагреть водород, чтобы какая-то доля электронов запрыгнула на второй уровень (потом они снова вернутся вниз, но перед этим какое-то время там проведут) — и тогда пролетающий оптический квант может быть поглощен электроном со второго уровня, что проявится в видимом спектре.

Итак, холодный водород не будет выдавать бальмеровскую серию, а теплый — будет. А если мы еще сильнее нагреем водород? Тогда много электронов «запрыгнет» на третий и более высокие уровни, а второй уровень снова обеднеет. Очень горячий водород тоже не даст спектральных линий, которые можно увидеть в оптическом диапазоне. Если пройтись от холодных звезд к самым горячим, то мы увидим, что линии любого элемента могут быть достаточно хорошо представлены в спектре лишь в узком диапазоне температур.

Когда астрофизики это поняли, им пришлось переставить спектральные классы в порядке роста температуры: от холодных звезд к горячим. Эта классификация по традиции тоже называется гарвардской, но она уже естественная, физическая. У звезд спектрального класса A температура поверхности около 10 000 K, водородные линии максимально яркие, а с ростом температуры они начинают исчезать, потому что атом водорода при температуре больше 20 000 K ионизуется. Аналогично обстоит дело с другими химическими элементами. Кстати, в спектрах звезд холоднее 4000 K присутствуют не только линии отдельных химических элементов, но и полосы, соответствующие устойчивым при таких температурах молекулам сложных веществ (например, оксидов титана и железа).

**Спектральные классы звезд**

| Типы по Секки | Первоначальные гарвардские спектральные классы (каталог им. Генри Дрэпера) | |
|---|---|---|
| I | **A** | Сильные и широкие линии водорода |
| | **B** | Подобен классу A, плюс «орионовы линии», замеченные у звезд в Орионе и позже отождествленные с нейтральным гелием |
| | **C** | Сдвоенные линии водорода |
| | **D** | Спектр с эмиссионными линиями |
| II | **E** | Фраунгоферовы линии H и K, а также линия Hβ |
| | **F** | Подобен классу E, но видны все линии водорода |
| | **G** | Подобен классу F, но с дополнительными линиями |
| | **H** | Подобен классу F, но с понижением яркости в голубой области |
| | **I** | Подобен классу H, но с дополнительными линиями |
| | **K** | Спектр с молекулярными полосами |
| | **L** | Особые формы и вариации класса K |
| III | **M** | Тип III по Секки |
| IV | **N** | Тип IV по Секки |
| Пикеринг V | **O** | В основном эмиссионные линии |
| | **P** | Планетарная туманность |
| | **Q** | Все остальные (в 1922 г. определены как спектры новых) |

Получившуюся при упорядочивании классов по температуре последовательность букв OBAFGKM студентам-астрономам довольно просто запомнить, тем более что придуманы всякие мнемонические поговорки. Самая известная на английском — «Oh, Be A Fine Girl, Kiss Me!» Диапазон температур поверхности таков: у самых горячих звезд — десятки тысяч градусов, у самых холодных — две с небольшим тысячи (рис. 11.19). Для более тонкой классификации каждый класс разделили на десять подклассов и к каждой букве справа приписали одну цифру от 0 до 11.

Замечу, что оптические спектры фотографируют в цвете только для красоты, а для научных исследований это бессмысленно, поэтому обычно делают черно-белые изображения.

Редко, но бывает, что звезды демонстрируют линии не поглощения (темные на ярком фоне), а излучения (яркие на темном фоне). Их происхождение уже не так легко понять, хотя это тоже довольно элементарно. В начале лекции мы видели, что разреженное об-

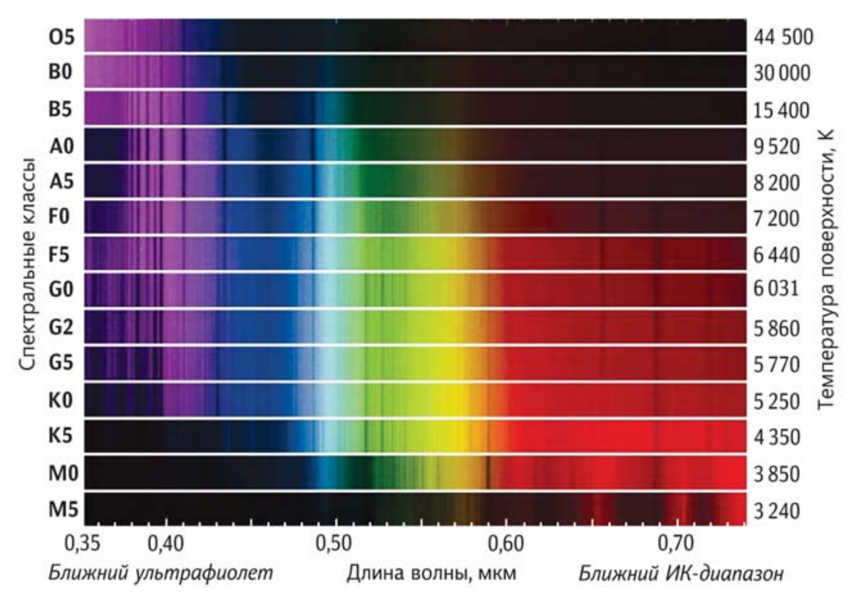



**Рис. 11.19.** **Типичные спектры звезд ряда спектральных подклассов, характеризующихся температурой поверхности.**

лачко горячего газа дает нам линии излучения. Когда мы смотрим на звезду с линиями излучения в спектре, мы понимаем, что источником этих линий служит разреженный, полупрозрачный газ, находящийся на периферии звезды, в ее атмосфере. То есть это звезды с протяженной горячей атмосферой, которая прозрачна в континууме (в промежутках между линиями), а значит, почти ничего в нем не излучает (закон Кирхгофа). Но она непрозрачна в отдельных спектральных линиях, а раз непрозрачна в них, то и сильно в них излучает.

На сегодняшний день гарвардская классификация звездных спектров расширена. В нее добавлены новые классы, соответству-

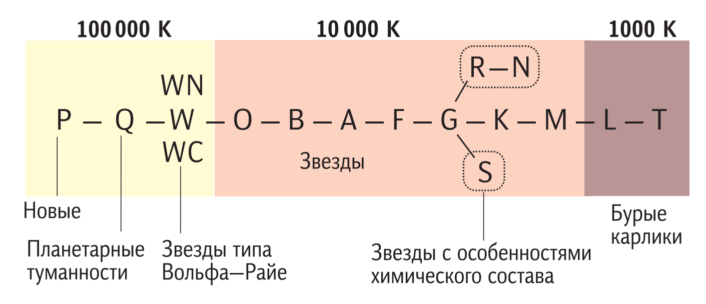



**Рис. 11.20.** **Схема Гарвардской классификации звезд.**

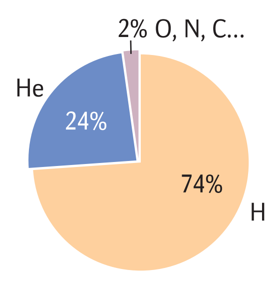



**Рис. 11.21. Химический состав Солнца по массе.**

ющие горячим звездам с протяженной атмосферой, ядрам планетарных туманностей и новых звезд, а также недавно открытым довольно холодным объектам, занимающим промежуточное положение между нормальными звездами и крупнейшими планетами; их называют «коричневыми карликами» или «бурыми карликами» (англ. *brown dwarf*).

Есть еще ответвления от некоторых классов для звезд с оригинальным химическим составом. Это, кстати, загадка для нас: до сих пор неясно, почему у некоторых звезд вдруг наблюдается избыток какого-то редкого химического элемента. Ведь химический состав звездных атмосфер, несмотря на разнообразие спектров, очень схож: Солнце и подобные ему звезды на 98% по массе состоят из первых двух химических элементов — водорода и гелия, а все остальные элементы представлены лишь двумя оставшимися процентами массы.

Солнце — самый яркий для нас источник света, его спектр мы можем растянуть очень сильно, различить в нем десятки тысяч спектральных линий и расшифровать их. Так, установлено, что на Солнце присутствуют все элементы таблицы Менделеева. Однако открою вам секрет: до сих пор примерно 20 линий солнечного спектра, очень слабых, остались неидентифицированными. Так что даже с Солнцем проблема распознавания химического состава еще не решена до конца.

Распределение химических элементов в атмосфере Солнца обладает рядом интересных закономерностей (рис. 11.22). Считается, что это типичный состав звездного вещества. И для большинства звезд это верно. Начиная с углерода и до самых тяжелых ядер (по крайней мере до урана) идет довольно ровный спад распространенности элементов по мере увеличения их порядкового номера. Однако между гелием и углеродом имеется очень большой «провал» — так происходит потому, что литий и бериллий легче всех участвуют в термоядерных реакциях, они активнее даже водорода и гелия. И как только температура поднимается выше миллиона градусов, они очень быстро выгорают.

Но и внутри этого ровного тренда есть особенности. Во-первых, резко выделяется пик железа. В природе, в том числе и в звездах,

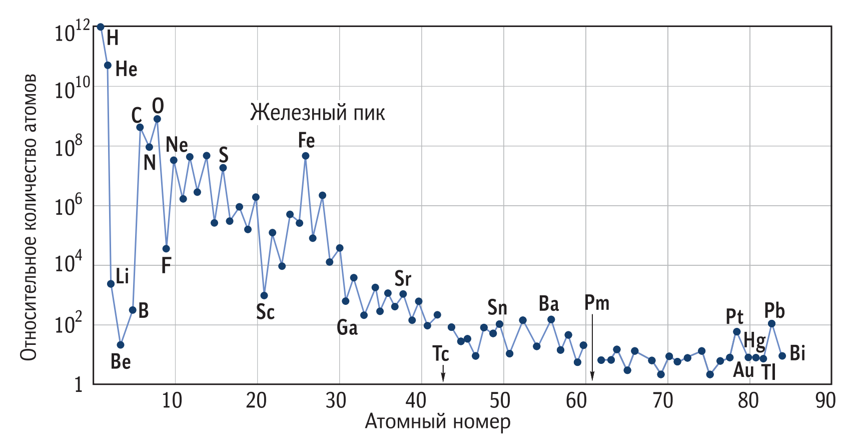



**Рис. 11.22.** Распределение химических элементов в атмосфере Солнца.

железа, никеля и близких к ним элементов по сравнению с их соседями необычайно много. Дело в том, что железо — необычный химический элемент: это самый конечный продукт термоядерных реакций, идущих в равновесных условиях, т. е. без всяких взрывов. В термоядерных реакциях звезды синтезируют из водорода все более и более тяжелые элементы, но доходит дело до железа — и всё останавливается. Дальше, если мы попытаемся сделать что-то новое из железа в термоядерной реакции, добавляя к нему нейтроны, протоны, другие ядра, то никакого выделения тепла не будет: когда костер догорел, из золы уже ничего не получишь. Наоборот, для осуществления реакции пришлось бы подводить энергию извне, а сама по себе никакая реакция с железом в обычных условиях не пойдет. Поэтому железа в природе накопилось много.

Другой важный момент, на который стоит обратить внимание: линия, соединяющая на графике точки, имеет пилообразный вид. Так получается потому, что ядра с четным количеством нуклонов (протонов и нейтронов) гораздо более стабильны, чем с нечетным. Поскольку стабильные ядра легче создать, чем разрушить, этих ядер по сравнению с соседними элементами нарабатывается всегда больше на целый порядок, а то и на полтора.

В отличие от Солнца, в составе земного шара и землеподобных планет содержится очень мало водорода и гелия, но начиная с углерода «звездное» распределение химических элементов характерно и для них. Поэтому у каждой планеты, не только у Земли, есть крупное железное ядро.

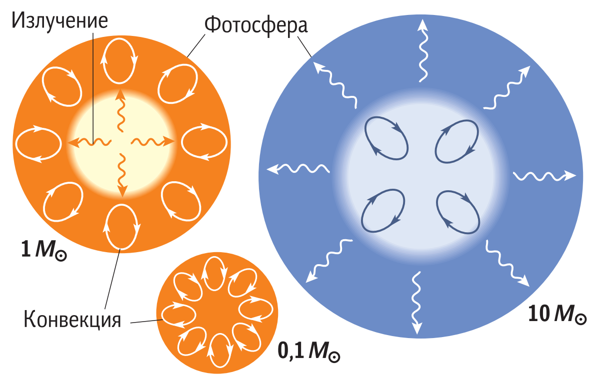



**Рис. 11.23.** **Звезды неоднородны, и вещество в них перемешивается плохо, поэтому химический состав поверхности звезды не отражает состава ее недр и особенно ядра.**

К сожалению, спектры показывают нам состав только поверхности звезд. Наблюдая свет звезды, мы почти ничего не можем сказать о том, что у нее внутри, а внутренняя жизнь звезд разной массы различается. Перенос энергии в звезде может происходить несколькими способами, преимущественно лучеиспусканием и конвекцией (рис. 11.23). Например, у звезд типа Солнца в центральной части, где идут термоядерные реакции, энергию переносит в основном излучение, и вещество ядра не перемешивается с вышележа-

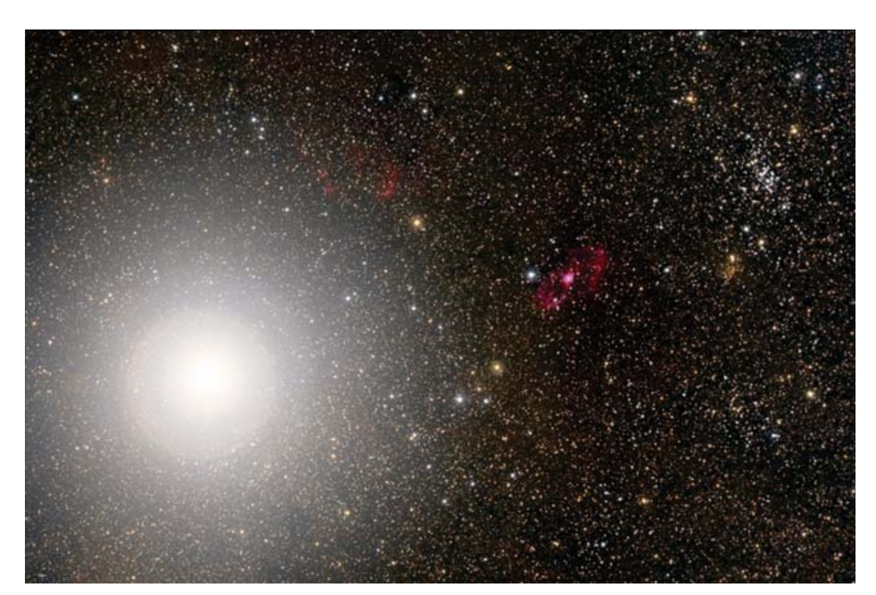


**Рис. 11.24.** **Видимый блеск звезд не отражает истинную мощность их излучения, т. е. светимость, а чаще определяется расстоянием до них. На фото α Кентавра. Фото: Marco Lorenzi.**

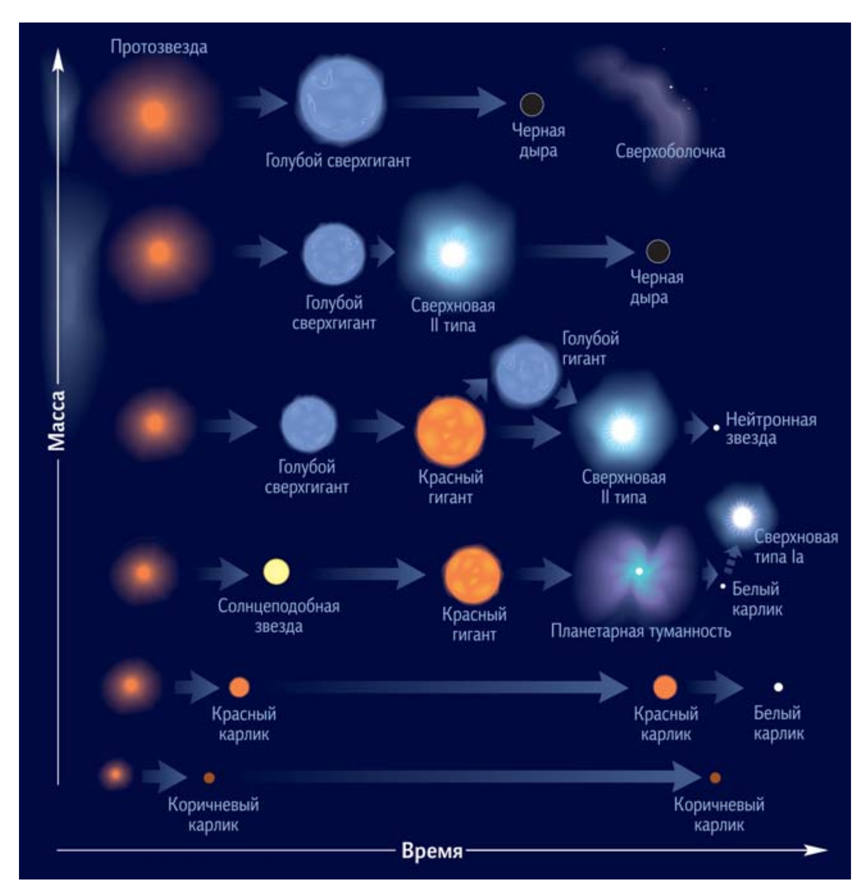



**Рис. 11.25.** Схема эволюции звезд разной массы.

щими слоями. На периферии перемешивание идет, но оно не достигает тех внутренних областей, в которых постепенно меняется химический состав за счет термоядерных реакций. Поэтому продукты термоядерной реакции не выносятся на поверхность, где циркулирует исходное вещество, из которого Солнце когда-то родилось. У более массивных звезд внутри идет конвективное перемешивание, но дальше оно не распространяется. «Выпрыгнуть» на поверхность звезды наработанные химические элементы тоже не могут.

Наконец, маломассивные — это самые «правильные» звезды: конвекция у них — главный механизм переноса тепла, внутри них происходит полное перемешивание вещества. Значит, казалось бы, на их поверхность должно всплывать то, что наработалось в центре в

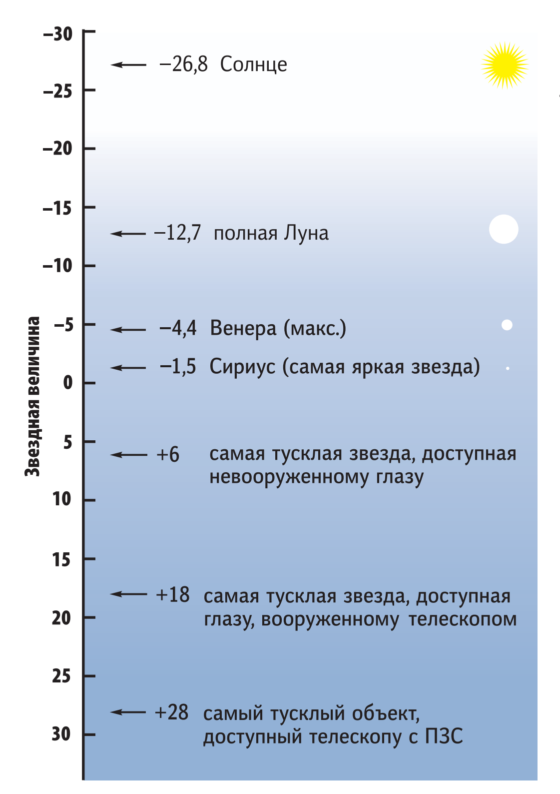



**Рис. 11.26.** **Диапазон видимых звездных величин и положение в нем некоторых наблюдаемых объектов.**

термоядерных реакциях. Однако в этих маленьких звездах термоядерные реакции идут очень медленно, они очень экономно расходуют свою энергию и медленно эволюционируют. Продолжительность их жизни в сотни и тысячи раз больше, чем у звезд типа Солнца, т. е. триллионы лет. А за те 14 млрд лет, что прошли с момента рождения Вселенной, в их составе практически ничего не изменилось. Они еще «младенцы», многие из них еще недоформировались и не запустили нормальный термоядерный цикл.

Таким образом, о том, что находится внутри звезд, какой там химический состав вещества, мы не знаем до сих пор, натурных данных у нас нет. Только моделирование может нам что-то об этом сказать.

### Диаграмма Герцшпрунга—Рассела

Видимый блеск звезд измеряют в обратной логарифмической шкале звездных величин, но для физика это неинтересно. Ему важна полная мощность излучения звезды, а ее мы не можем просто




**Рис. 11.27.** Генри Норрис Рассел (слева) и Эйнар Герцшпрунг.

так угадать по фотографии. Например, Альфа Кентавра среди других звезд имеет потрясающую яркость (см. рис. 11.24), но это вовсе не значит, что она самая мощная, ничего подобного. Это совершенно обычная звезда типа Солнца, просто случайно она оказалась к нам намного ближе остальных и поэтому, как фонарь, заливает своим светом окрестный кусочек неба; хотя большинство соседних с ней на этом фото звезд — гораздо более мощные источники излучения, они расположены дальше.

Итак, надо оценить мощность звезды как можно более точно. Для этого мы используем фотометрический закон обратных квадратов: измеряя видимую яркость звезды (плотность светового потока, достигающего Земли) и расстояние до нее, вычисляем полную мощность ее излучения в ваттах. Теперь можно представить общую физическую картину, изобразив все звезды на двумерной диаграмме, на осях которой откладывают две выведенные из наблюдений величины — температуру поверхности звезды и относительную мощность ее излучения (астрономы, принимая во внимание только оптический диапазон, называют эту мощность светимостью и измеряют в единицах мощности Солнца). В начале XX в. такую картинку впервые построили два астронома: датчанин Эйнар Герцшпрунг и американец Генри Норрис Рассел, по именам которых она называется диаграммой Герцшпрунга—Рассела.

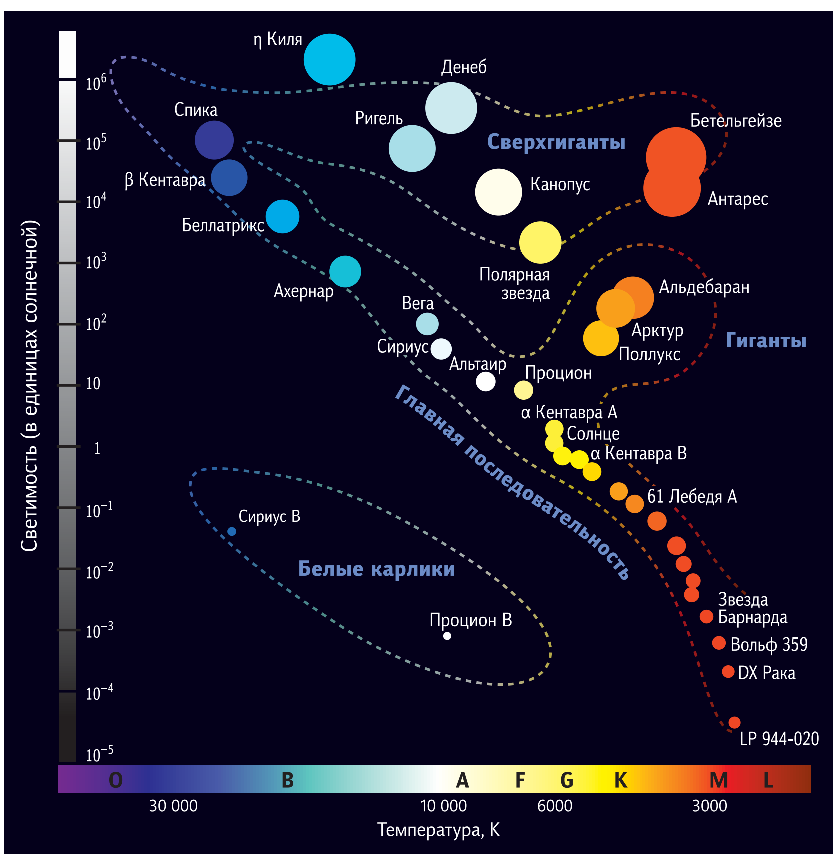



**Рис. 11.28. Диаграмма Герцшпрунга—Рассела и положение на ней наиболее известных звезд.**

Солнце, звезда с температурой около 6000 К и с единичной мощностью, располагается почти посередине этой диаграммы. Вдоль диапазона изменения обоих параметров звезды распределены практически непрерывно, но по плоскости диаграммы они не разбросаны как попало, а группируются в компактные области.

Сегодня на диаграмме Герцшпрунга—Рассела выделяют несколько типичных групп, в которых сконцентрированы наблюдаемые в природе звезды (рис. 11.28). Подавляющее большинство звезд (90%) лежит в узкой полосе по диагонали диаграммы; эту группу называют *главной последовательностью.* Она распространяется от тусклых холодных звезд до горячих ярко светящихся: от миллионных долей до нескольких миллионов солнечных светимостей. Для физи-

ка это естественно: чем горячée поверхность, тем сильнее она излучает.

По обе стороны от главной последовательности находятся группы аномальных звезд. Некоторое количество звезд с высокой температурой обладает необычно низкой светимостью (в сотни и тысячи раз меньше солнечной) из-за своего мелкого размера — мы называем их *белыми карликами*, такие они по цвету. Другие исключительные звезды, в противоположном углу диаграммы, характеризуются более низкой температурой, но огромной светимостью, — значит, они явно имеют больший физический размер: это *гиганты*.

В процессе своей эволюции звезда может менять положение на диаграмме. Об этом — в следующей лекции.



# 12 Эволюция звезд

Ничто материальное в нашем мире не вечно, и звезды не являются исключением. Каждая звезда в течение своей жизни проходит определенные этапы развития, а к старости особенно сильно меняет свои свойства.

**Такие разные звезды**

В прошлой лекции я рассказывал, что по спектру звезды легко измерить ее внешние параметры: температуру поверхности и мощность излучения. И в начале XX в. два астронома, Эйнар Герцшпрунг и Генри Норрис Рассел, нанесли все звезды, для которых были определены спектральные классы (а значит, температура поверхности) и измерены расстояния (а значит, вычислена мощность излучения, иначе называемая светимостью звезды), на диаграмму, отражающую эти два качества. Выяснилось, что большинство звезд расположилось вдоль диагонали диаграммы: от «холодных» звезд низкой светимости до горячих звезд высокой светимости. Это объясняется вполне естественно: чем выше температура звезды, тем больше должна быть мощность излучения с ее поверхности. Удивило другое: помимо звезд «нормальных», укладывающихся на главную последовательность, существуют звезды холодные, красноватые, но при этом мощно излучающие (а значит, имеющие большую площадь поверхности, т. е. большой размер), и звезды горячие, белые, но излучающие мало света (а значит, имеющие малый размер). Первые назвали красными гигантами, вторые — белыми карликами. Размеры звезд семейства главной последовательности различаются не очень сильно: от самых крупных и очень горячих (спектральный класс O, температура поверхности около 50 000 K) до самой «мелочи» (спектральный класс M, температура поверхности около 3000 K) диапазон составляет менее 3 порядков.

Если мы знаем температуру тела $T$ и полную мощность излучения $W$ с его поверхности, то из формулы для плотности потока энергии абсолютно черного тела $W = 4\pi R^2 \sigma T^4$ легко рассчитаем его раз-

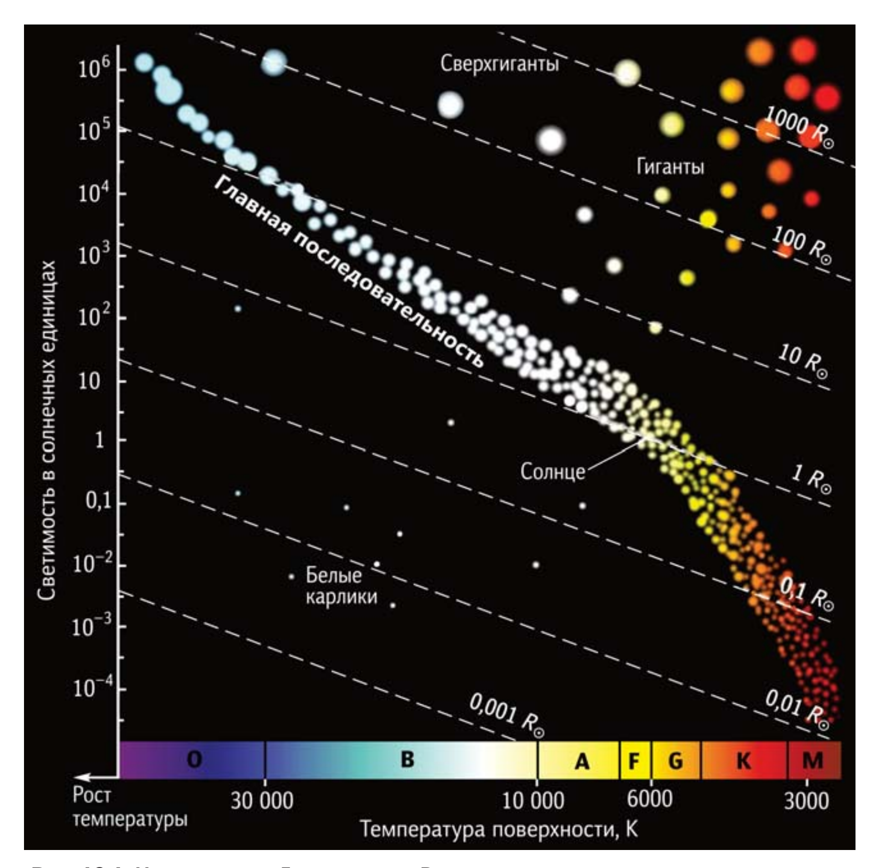



**Рис. 12.1.** **На диаграмму Герцшпрунга–Рассела нанесены изолинии радиусов звезд**

мер *R*. На диаграмме Герцшпрунга—Рассела (в логарифмических координатах) линии равного радиуса тел будут параллельными прямыми (рис. 12.1), и линия, соответствующая радиусу Солнца, пересекает главную последовательность как раз там, где Солнце и находится. В то время как по размеру звезды на главной последовательности различаются не очень сильно (примерно в 200 раз), их массы разнятся чуть заметнее: от десятой доли до нескольких сотен масс Солнца.

Но вне главной последовательности диапазон размеров и масс огромен, и для того, чтобы характеризовать эти звезды, спектральной классификации оказывается недостаточно. Например, к одному и тому же классу M могут относиться холодные белые карлики, нормальные звезды, субгиганты, гиганты, сверхгиганты, имеющие одинаковую температуру, и, чтобы их как-то разделить, исполь-

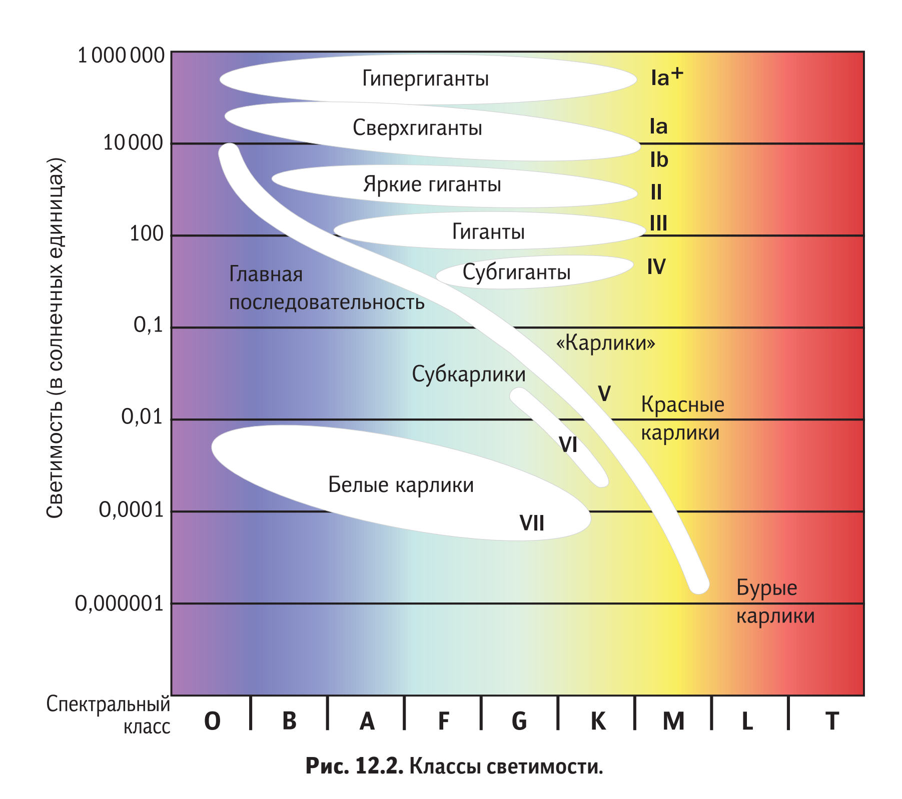



**Рис. 12.2.** Классы светимости.

зуется второй параметр — мощность их излучения. Для этого профессиональные астрономы ввели *классы светимости*, обозначаемые римскими цифрами (рис. 12.2); например, VII — белые карлики, V — звезды главной последовательности, I — сверхгиганты. Иногда слово *supergiant* переводят с английского как «супергигант», но это неправильно, такого термина в русском языке нет. Семейство сверхгигантов пришлось еще подразделить на не очень и очень мощные, вплоть до недавно открытых гипергигантов, в миллион раз мощнее Солнца. Таких очень мало в природе: в нашей Галактике их буквально несколько штук. В соседних галактиках они тоже есть.

Давайте посмотрим внимательно на таблицу физических параметров звезд главной последовательности разных спектральных классов, а также красных гигантов и белых карликов. В ней даны масса, радиус, светимость (в отношении к соответствующей величине для Солнца), средняя плотность (ρ) и плотность вещества в центре ($\rho_c$) звезды нулевого возраста, т. е. только что родившейся (по мере эволюции значения этих параметров меняются).

**Классы светимости на диаграмме Герцшпрунга–Рассела**

| Обозначение | Характеристика звезд |
|---|---|
| 0 или Ia+ | Гипергиганты, или сверхгиганты экстремальной светимости |
| Ia | Яркие сверхгиганты |
| Iab | Сверхгиганты промежуточной светимости |
| Ib | Не очень яркие сверхгиганты |
| II | Яркие гиганты |
| III | Нормальные гиганты |
| IV | Субгиганты |
| V | Звезды главной последовательности |
| VI (или префикс sd) | Субкарлики |
| VII (или префикс D) | Белые карлики |

**Физические параметры разных типов звезд**

| $M, M_\odot$ | $R, R_\odot$ | ρ, г/см³ | $\rho_c$, г/см³ | $T_c$, $10^6$ K | $L, L_\odot$ | Спектр |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Главная последовательность нулевого возраста** | | | | | | |
| 50 | 11 | 0,053 | 2,0 | 37 | $5 \cdot 10^5$ | 06 |
| 20 | 7,2 | 0,075 | 5,0 | 35 | $5 \cdot 10^4$ | 09 |
| 10 | 4,9 | 0,13 | 8,9 | 31 | 5000 | B2 |
| 5 | 3,5 | 0,15 | 20 | 27 | 630 | B6 |
| 2 | 1,9 | 0,41 | 68 | 21 | 25 | A5 |
| 1 | 0,94 | 1,7 | 90 | 14 | 0,8 | G3 |
| 0,3 | 0,30 | 15 | 100 | 8 | 0,015 | M3 |
| 0,2 | 0,22 | 25 | 158 | 7 | 0,006 | M4 |
| 0,1 | 0,12 | 81 | 690 | 5 | 0,001 | M5 |
| 0,085 | 0,074 | 290 | 2000 | 4 | 0,0004 | M6 |
| **Красный гигант** | | | | | | |
| 1,3 | 27 | 0,0001 | 320 | 40 | 150 | K2 |
| **Белый карлик** | | | | | | |
| 0,9 | 0,01 | $10^6$ | $1,6 \cdot 10^7$ | 8 | 0,001 | |

Для главной последовательности звезд, если смотреть в направлении от самых массивных к самым мелким, радиус звезды, естественно, уменьшается, а ее средняя плотность (отношение массы к объему) увеличивается. У нашего Солнца средняя плотность — около

1,4 г/см$^3$, как у крепкого раствора соли; у больших звезд она меньше, а у маленьких звезд — больше. Центральная плотность намного больше: у больших звезд она составляет около 2 г/см$^3$, как в сахарном сиропе. Солнце в момент рождения имело плотность 90 г/см$^3$, а в нашу эпоху — около 160 г/см$^3$. А в центре совсем крохотных звезд, которые в десять раз меньше Солнца, плотность огромная — 2 кг/см$^3$; тел с такой плотностью на Земле мы не знаем. При таких больших плотностях вещество начинает вырождаться: элементарные частицы атомов оказываются настолько близко к друг другу, что начинают вести себя совсем не так, как частицы идеального газа.

Что касается температуры, то чем массивнее звезда, тем горячée она в центре. У самых маленьких звезд — несколько миллионов градусов, при этом могут идти разве что самые «дохлые» термоядерные реакции — с участием лития, бериллия. Внутри Солнца уже больше 10 млн градусов, там в реакции участвует водород, а у массивных звезд при их высокой температуре, конечно, «горят» и гелий, и углерод, и кислород — в общем, все элементы до железа.

Светимость, естественно, повышается с ростом массы. Маленькие звездочки излучают в тысячи раз меньше, чем Солнце. Но их масса (т. е. запас топлива) всего лишь в 10 раз меньше, чем у Солнца, а скорость расходования топлива меньше в тысячу раз — и это значит, что светить они будут намного дольше, чем Солнце. Такие звезды могут в сто раз дольше поддерживать свое излучение, и они за время существования Вселенной не то что не постарели — все они в эволюционном смысле еще младенцы. Они будут светить триллионы лет за счет медленно протекающих термоядерных реакций.

### Как долго светит звезда

Интересно проследить жизнь звезды типа Солнца на диаграмме Герцшпрунга—Рассела от момента, когда оно было еще не звездой, а аморфным газовым облаком в космосе. Температура у него была сначала небольшая (за пределами диапазона диаграммы), а гравитация постепенно стягивала это облако, формируя из него звезду. За счет гравитационного сжатия оно нагревалось, а его размер уменьшался и наконец приблизился к нынешнему радиусу Солнца. Оно перестало уменьшать свой размер, но внутри продолжало сжиматься, и температура поверхности некоторое время продолжала расти, пока мощность теплового излучения не стала превышать тепловой поток изнутри звезды. Какое-то время снаружи звезда остывала, но

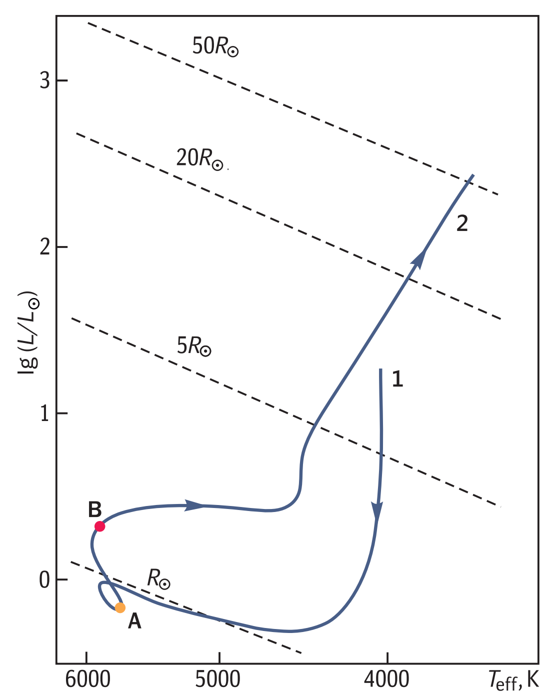



**Рис. 12.3.** **Изменение параметров Солнца на диаграмме Герцшпрунга—Рассела в ходе его эволюции: 1 — сжатие на стадии протозвезды; 2 — расширение на стадии красного гиганта. В точке А начинаются реакции горения водорода. В точке В горение перемещается в слой над ядром, а само гелиевое ядро начинает сжиматься.**

термоядерный процесс в ядре набирал ход, и однажды его скорость стала настолько высокой, что он полностью уравновесил потери энергии с поверхности звезды. И тогда внешняя эволюция Солнца прекратилась, термоядерные реакции стали поддерживать его светимость на одном уровне — и звезда на диаграмме «зависла» в одной точке (А). Постепенно она меняется, но происходит это очень медленно. Водород в ядре превращается в гелий, который накапливается в ядре, т. е. у звезды увеличивается гелиевое ядро, в котором термоядерные реакции не происходят (из-за недостаточно высокой температуры), а водород «горит» на поверхности этого ядра. И последующие почти 10 млрд лет звезда понемногу движется к точке В.

Наконец наступает момент, когда гелиевое ядро становится настолько тяжелым, что уже не может само себя удержать от гравитационного сжатия, к тому же и сверху на него давят все остальные оболочки звезды. И ядро начинает стремительно сжиматься. А при адиабатическом сжатии, как мы знаем, газ нагревается, т. е. вновь включается гравитационный источник энергии. Но выделяющемуся теплу трудно пройти сквозь непрозрачные слои звезды, и оно заставляет ее разбухать. И точка на диаграмме опять поедет вверх:

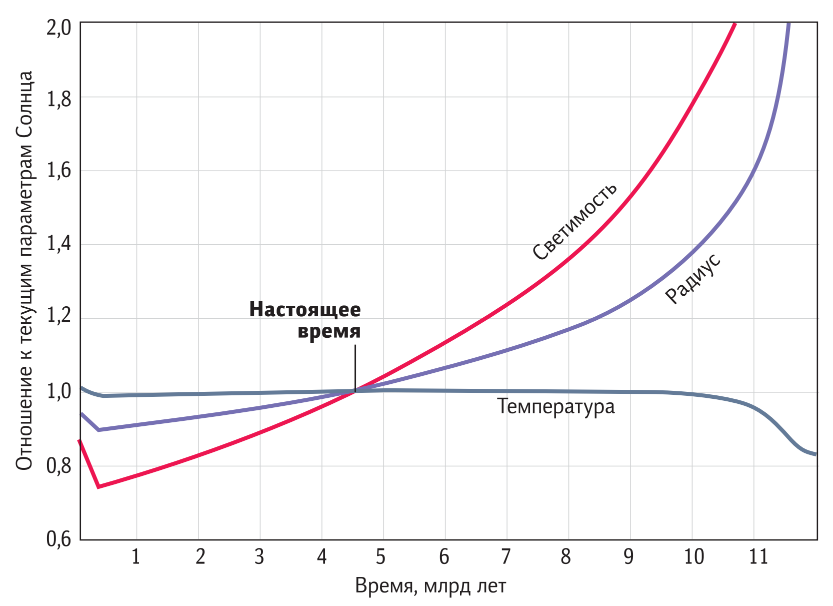



**Рис. 12.4.** Относительное изменение внешних параметров Солнца во времени.

размер был равен одному радиусу Солнца, а при расширении приобретает значения 5, 20, 80 радиусов Солнца. Звезда «распухает», и, хотя ее поверхность немного охлаждается, в целом эволюция ведет к образованию гиганта.

Точные расчеты всей жизни Солнца от зарождения до конца, а это 12 млрд лет, показывают, что с возрастом звезда «потолстеет», сначала понемногу, а потом начнет быстро увеличиваться и становиться гигантом (рис. 12.4). При этом всё быстрее и быстрее будет нарастать светимость (мощность излучения). А температура поверхности долго будет оставаться неизменной, но, когда радиус станет быстро увеличиваться, она немного снизится. И так получится относительно холодная звезда-гигант.

Элементный состав вещества всех звезд примерно одинаков: в основном они «сделаны» из водорода и гелия. Но точные расче-




**Рис 12.5.** Визуальная эволюция Солнца.

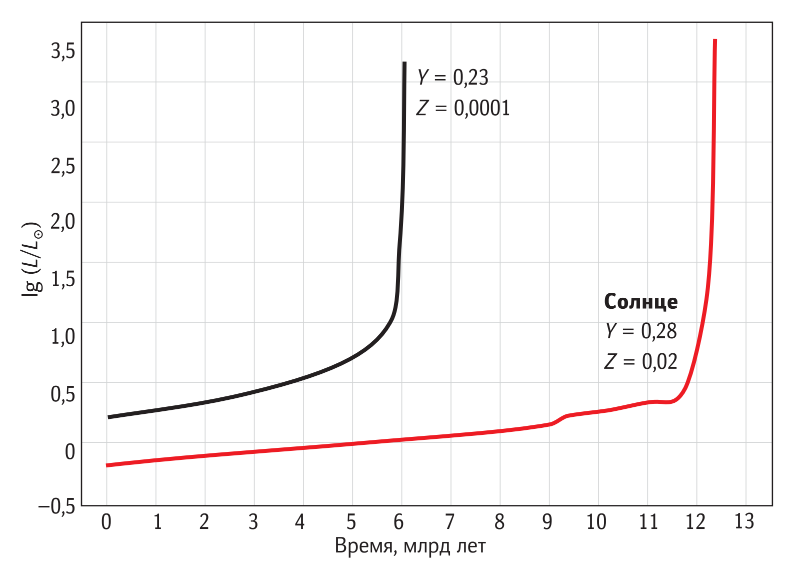



**Рис. 12.6. Временной график светимости звезд с начальной массой 1 $M_\odot$, но с разным химическим составом. *X, Y, Z* — массовые доли соответственно водорода, гелия и всех остальных элементов, вместе взятых. $X + Y + Z = 1$.**

ты показывают, что даже незначительные различия в соотношении элементов могут существенно повлиять на светимость и, соответственно, на время стабильной жизни звезды (рис. 12.6). Звезда первого поколения (возникшая сразу после создания Вселенной) практически не содержит элементов тяжелее гелия, а в нашем Солнце их 2% — и жизнь складывается уже по-разному. Несмотря на одинаковую массу, светимость у них разная: звезда с меньшим количеством тяжелых элементов является более ярким источником света. А почему?

Тяжелые элементы сложнее ионизовать полностью, т. е. труднее оторвать все электроны от их ядер. Поэтому даже при температуре звездных недр эти элементы ионизуются лишь частично. Если водородно-гелиевая плазма довольно прозрачна, то тяжелые атомы намного интенсивнее поглощают световые кванты, энергия которых расходуется на переходы внутренних электронов атома на внешние оболочки. Когда тяжелых элементов почти нет, звезда светит ярко и быстро сжигает свою массу в термоядерных реакциях, поэтому срок ее жизни невелик. А жизнь нашего Солнца благодаря изначально более разнообразному химическому составу продлится 12 млрд лет: оно экономичнее расходует свою массу, превращая ее в энергию.

Но в конце концов Солнце понемногу станет более мощным, а в течение последнего миллиарда лет его светимость возрастет в тысячи раз. Нас, правда, это уже не будет волновать, потому что через 2 млрд лет мощность Солнца станет примерно на 20% больше, чем сейчас, при этом на Земле температура станет выше +100 °C, океаны выкипят — и на этом эволюция земной биосферы закончится. Солнце же будет и дальше наращивать свою мощность, и перед самым концом, когда гелиевое ядро не выдержит своей тяжести и сожмется, а сжимаясь, нагреется, в нем начнутся термоядерные реакции с участием гелия: он будет превращаться в углерод, кислород, азот — и выделяющаяся при этом энергия значительно добавит мощности в излучение Солнца. Этот прогноз сделан на основе очень детальных расчетов группы итальянских астрофизиков (Girardi L., Bressan A., Chiosi C., Bertelli G., Nasi E. Astronomy and Astrophysics Supplement. 1996, V. 117. P. 113–125).

Вот как с возрастом меняется химический состав ядра звезды: поначалу гелия было мало, а водорода много. Водород постепенно «сгорает», из него получается гелий. В конце жизни звезды в ее центре уже почти нет водорода, остался один гелий. И плотность там начинает стремительно расти: к концу эволюции вещество на 3–4 порядка плотнее изначального. Ядро сжимается, а оболочка расширяется, т. е. звезда становится все более неоднородной по плотности — это происходит в любой стареющей звезде, а когда звезда уже погибает, в ее ядре начинаются взрывы, оно начинает пульсировать Но это уже другая история.

Таким образом, вся видимая жизнь Солнца укладывается в несколько этапов. Сначала оно родилось из облака разреженного газа и бóльшую часть жизни живет, почти не меняясь (сейчас мы находимся в середине жизненного пути Солнца). Потом светимость возрастает, и наконец происходят резкие изменения: оболочка начинает быстро распухать, ее гравитационная связь с ядром звезды становится незначительной, и под давлением излучения ядра оболочка сбрасывается и «растворяется» в окружающем пространстве — из звезды возникает так называемая планетарная туманность. Ядро остается, но термоядерных источников энергии у него уже нет, оно расходует свой запас тепла, постепенно охлаждаясь, сжимается и становится плотным объектом. В зависимости от массы из обычной звезды получается либо белый карлик, либо нейтронная звезда, либо черная дыра.

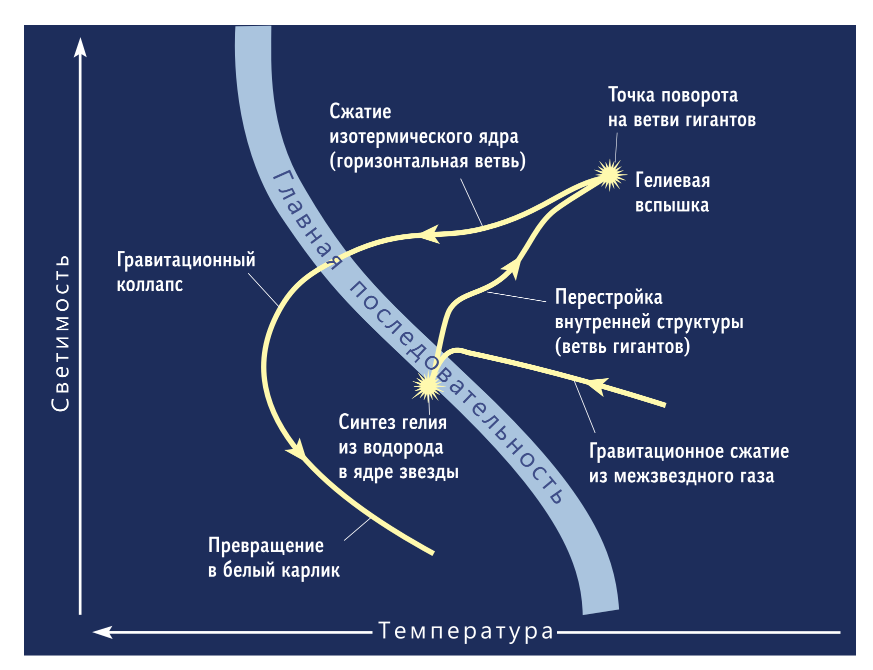



**Рис. 12.7.** **Условная траектория Солнца на диаграмме Г—Р после покидания им главной последовательности, где свечение звезд обусловлено превращением водорода в гелий.**

Пертурбации, происходящие со стареющей звездой типа Солнца, особенно сильно проявляются на диаграмме «светимость—температура поверхности». Если предыдущие 9 млрд лет Солнце едва-едва передвигалось в пределах главной последовательности (пока расходовался водород ядра), то, начав превращаться в красный гигант, оно будет стремительно увеличивать размер и светимость, пока водород продолжает «гореть» вокруг гелиевого ядра. Когда оно не выдерживает своего веса, вспыхивает гелий, температура возрастает, и звезда «зависает» на другой последовательности звезд, которые светят благодаря «горению» гелия. Но он быстро (примерно за 100 млн лет) выгорает, и звезда снова становится красным гигантом, уже более ярким. Наконец звезда сбрасывает оболочку и постепенно гаснет.

Это было лишь схематичное описание процесса, а при аккуратном расчете проявляются многие детали. В частности, выявляются критические точки жизни Солнца (рис. 12.7). Так, особенно сильно меняется светимость: Солнце будет светить (и греть Землю) в 4 тысячи раз сильнее, чем сейчас. Радиус в какой-то момент становится больше 200 сегодняшних радиусов Солнца. А сегодня его радиус

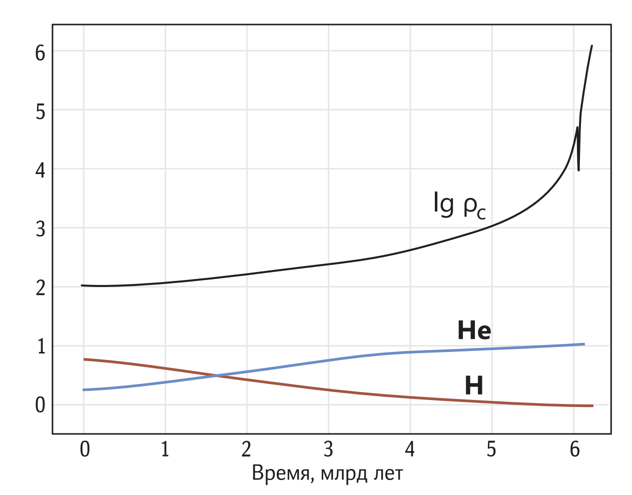



**Рис. 12.8.** Расчет эволюции плотности и элементного состава в центре водородно-гелиевой звезды с массой Солнца.

в 200 раз меньше радиуса земной орбиты. Значит, однажды граница Солнца достигнет Земли. Людей на ней к тому времени давно уже не будет, но что при этом произойдет с самой планетой?

Земная орбита тоже не останется неизменной, ведь звезда при расширении будет терять массу, сбросит почти половину. А раз звезда «худеет», планеты по спирали удаляются от нее, потому что гравитация ослабевает. Может, это спасет Землю? Специалисты долго думали, как произвести точные расчеты, учтя всевозможные факторы, чтобы узнать, сгорит ли Земля или сможет уйти от Солнца. И такой расчет был сделан (Schröder K.-P., Smith R. C. Mon. Not. R. Astron. Soc., 2008, v. 386, p. 155–163). Что же он показал?

Радиус орбиты Земли будет постепенно расти, она действительно немного отдалится от Солнца. Но при приближении Солнца вступят в силу такие физические эффекты, как приливное трение, а впоследствии — и газодинамическое сопротивление в атмосфере Солнца. Таким образом, Земля притормозит, приблизится к Солнцу и нырнет внутрь. Марс, однако, сохранится, Юпитер тоже. Ну а Меркурий, Венера и, как выяснилось, Земля будут поглощены превращающимся в красный гигант Солнцем. Само оно этого, конечно, не заметит: масса Солнца будет в 200 тысяч раз больше массы Земли, так что оно проглотит ее и не подавится. Марс в этом смысле более перспективен, потому что, хотя он всего лишь в полтора раза дальше от Солнца, чем Земля, до него оно не доберется.

А как другие звезды главной последовательности будут вести себя на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, когда состарятся? Все они

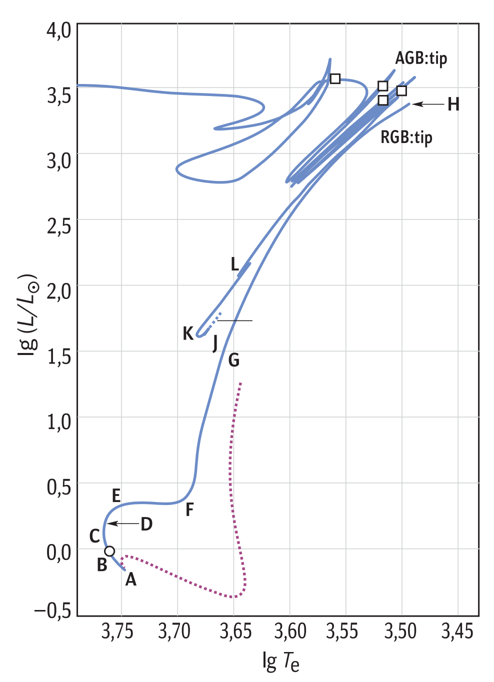



**Рис. 12.9.** Эволюционный путь Солнца на диаграмме Герцшпрунга—Рассела. Пунктир — протозвездная стадия (P — protostar). Точка A — начало главной последовательности (ZAMS — zero age main sequence); A–E — главная последовательность; E–F — покраснение; F–H — ветвь красных гигантов; I–L — горизонтальная ветвь. RGB:tip — вершина ветви красных гигантов; AGB:tip — вершина асимптотической ветви гигантов. Затем происходят тепловые пульсации, сброс планетарной туманности и переход к белому карлику.

эволюционируют в направлении к красным гигантам. Если масса звезды чуть меньше массы Солнца, то от главной последовательности она уходит почти вертикально вверх (т. е. даже при тысячекратном увеличении мощности температура поверхности меняется незначительно). Но чем больше исходная масса звезды, тем меньше она «подпрыгивает» на диаграмме, т. е. температура меняется, а светимость — нет. В чем тут дело?

**Результат точного моделирования эволюции Солнца с учетом потери массы (по: Sackmann et al., 1993)**

| Фаза | Возраст, млрд лет | $L$ ($L_\odot$) | $T_{eff}$, K | $R$ ($R_\odot$) | $M_{sun}$ ($M_\odot$) |
|---|---|---|---|---|---|
| ZAMS | 0,00 | 0,70 | 5596 | 0,89 | 1,000 |
| Настоящее время | 4,58 | 1,00 | 5774 | 1,00 | 1,000 |
| MS:hottest | 7,13 | 1,26 | 5820 | 1,11 | 1,000 |
| MS:final | 10,00 | 1,84 | 5751 | 1,37 | 1,000 |
| RGB:tip | 12,17 | 2730 | 2602 | 256 | 0,668 |
| ZA-He | 12,17 | 53,7 | 4667 | 11,2 | 0,668 |
| AGB:tip | 12,30 | 2090 | 3200 | 149 | 0,546 |
| AGB:tip-TP | 12,30 | 4170 | 3467 | 179 | 0,544 |

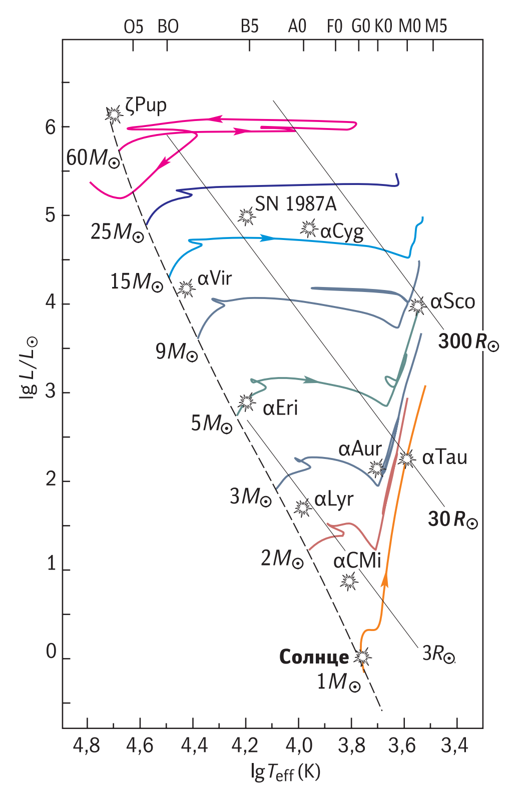



**Рис. 12.10.** **Эволюция звезд разной массы после покидания главной последовательности. Тонкие диагональные прямые — линии постоянного радиуса, пунктир — начальная главная последовательность. Для звезды с массой 1 $M_\odot$ расчет доведен до момента возгорания гелия в центре звезды, для звезд с массой 2, 3 и 5 $M_\odot$ — до начала горения углерода, а для еще более массивных звезд — до окончания горения углерода в центральной области. Указано нынешнее положение Солнца и некоторых ярких звезд, а также положение звезды Sk1-69° 202 незадолго до ее взрыва, породившего вспышку сверхновой SN 1987A в Большом Магеллановом Облаке.**

Физика этого явления очень проста. Массивные звезды являются настолько мощными источниками излучения, что главную роль в поддержании их равновесия, т. е. в противодействии гравитационным силам, играет давление не газа, а излучения. И они не могут стать еще более мощными источниками излучения, иначе их просто разорвет давление света. Такая звезда находится уже на пределе, или, как говорят, в условиях *критической светимости*, выше которой светимость быть не может. Возрастание мощности приводит к тому, что звезда начинает быстро расширяться, реакции в ней при этом замедляются, а тепловыделение и светимость остаются практически на том же уровне. Поэтому эволюция массивных звезд значительно сильнее отражается на температуре их поверхности, чем на светимости.

А от маломассивных звезд в правом нижнем углу на диаграмме никаких линий не нарисовано. Они светят настолько слабо, что еще многие миллиарды, а то и триллионы лет будут оставаться на глав-

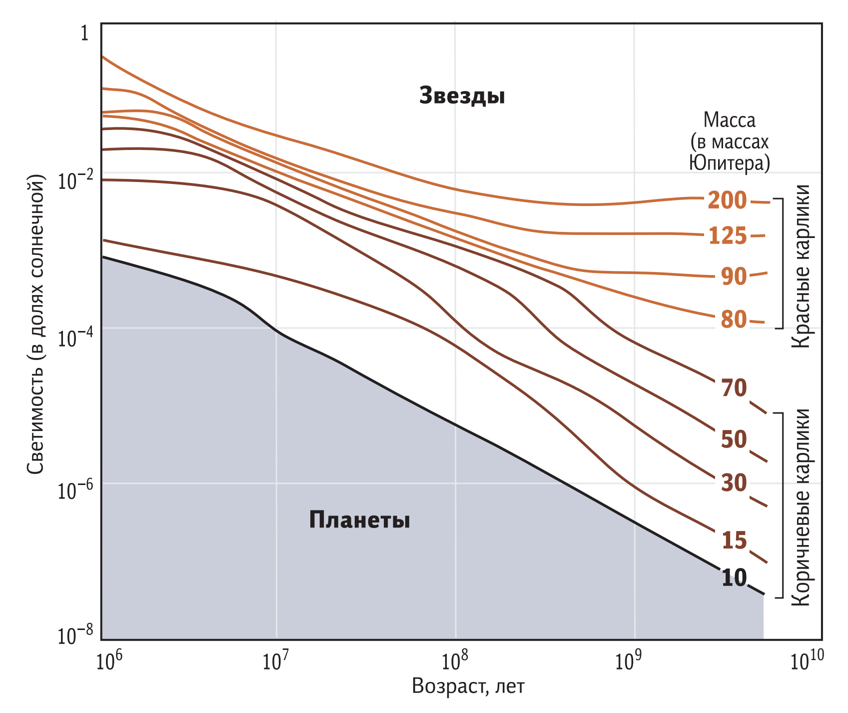



**Рис. 12.11. Будет ли новорожденная звезда светить долго или сразу же погаснет, существенно зависит от того, превысила ли ее масса критическую величину.**

ной последовательности, и ничего с ними происходить не будет. Потом они постепенно сожмутся и потухнут, но будет это отнюдь не скоро даже во вселенском масштабе времени.

Обратите внимание, что от массы звезды на главной последовательности мощность ее излучения зависит очень сильно: звезда вдвое большей массы светит в 12–16 раз мощнее. Время жизни такой звезды, соответственно, меньше. Например, звезда в 100 раз массивнее Солнца живет лишь 2–3 миллиона лет. Несмотря на то, что запас топлива у нее в 100 раз больше, сжигает она его «моментально», потому что мощность излучения в миллион раз больше.

Длительность характерных этапов жизни звезд зависит также от массы. Массивная звезда быстро рождается: проходит около миллиона лет — и гравитация делает из нее нормальную звезду. Маломассивные звезды гравитация сжимает медленно, поэтому и живут они дольше. Этап главной последовательно"сти, когда идет «горение» водорода, и заключительный этап красного гиганта, когда «горят» гелий и более тяжелые элементы, более массивные звезды также про-

**Время жизни и другие параметры звезд главной последовательности**

| Масса, $M_\odot$ | Радиус, $R_\odot$ | Светимость, $L_\odot$ | Температура, К | Спектральный класс | Время жизни, лет |
|---|---|---|---|---|---|
| 120 | 15,8 | 1 800 000 | 53 300 | O3 | 3 млн |
| 60 | 10,6 | 530 000 | 48 200 | O4 | 4 |
| 27 | 8,5 | 140 000 | 38 000 | O7 | 8 |
| 16 | 5,7 | 16 000 | 32 000 | BO | 13 |
| 8,3 | 4,8 | 2500 | 17 000 | B3 | 34 |
| 5,4 | 3,7 | 750 | 15 000 | B5 | 80 |
| 3,5 | 2,7 | 130 | 12 500 | B8 | 220 |
| 2,6 | 2,3 | 63 | 9 500 | A0 | 480 |
| 2,2 | 2,0 | 40 | 9 000 | A2 | 770 |
| 1,8 | 1,7 | 11 | 8 100 | A7 | 1 400 |
| 1,5 | 1,3 | 6,3 | 7 100 | F2 | 2 500 |
| 1,2 | 1,1 | 2,5 | 6 100 | F8 | 5300 |
| 1,0 | 1,00 | 1,10 | 5 800 | G2 | 10 млрд |
| 0,85 | 0,87 | 0,44 | 5 300 | G8 | 18 |
| 0,78 | 0,79 | 0,28 | 4 830 | K2 | 25 |
| 0,58 | 0,67 | 0,12 | 3 900 | K8 | 70 |
| 0,47 | 0,63 | 0,075 | 3 670 | M0 | 150 |
| 0,33 | 0,36 | 0,030 | 3 400 | M2 | 230 |
| 0,2 | 0,21 | 0,005 | 3 200 | M4 | 800 |

**Длительность этапов эволюции звезд разной массы (в годах)**

| Начальная масса | 1 $M_\odot$ | 5 $M_\odot$ | 10 $M_\odot$ |
|---|---|---|---|
| Формирование | $1\cdot10^8$ | $5\cdot10^6$ | $6\cdot10^5$ |
| Главная последовательность | $9\cdot10^9$ | $6\cdot10^7$ | $1\cdot10^7$ |
| Гигант | $1\cdot10^9$ | $1\cdot10^7$ | $1\cdot10^6$ |

ходят быстрее. При этом 80–90% своей жизни звезды проводят на главной последовательности, именно поэтому данная область диаграммы Г–Р «населена» столь большим количеством звезд. Красных гигантов примерно в 10 раз меньше, поскольку звезды проходят этот этап на порядок быстрее.

Интересный вариант получается, если масса исходного тела меньше 8% массы нашего Солнца. Такие тела, у которых масса промежуточная между маленькими звездами и большими планетами, долго искали и лишь недавно, в 1995 г., открыли. Эти звездоподобные объекты называют коричневыми карликами или бурыми кар-

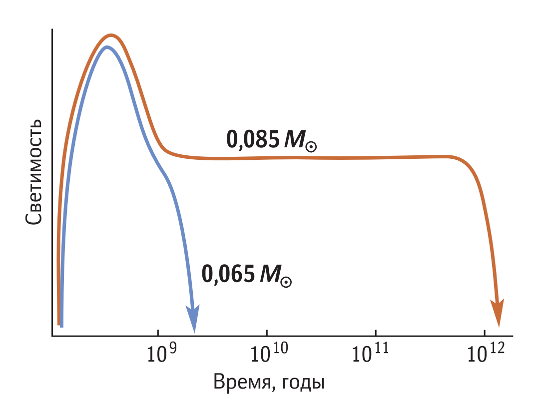



**Рис. 12.12.** Эволюция светимости двух протозвезд, массы которых чуть больше и чуть меньше нижнего предела, необходимого для протекания водородного термоядерного синтеза. Одна станет нормальной звездой, долгоживущим красным карликом, а другая — коричневым карликом с очень коротким этапом свечения.

ликами (*brown dwarf*). Их особенность в том, что основная термоядерная реакция (между протонами) в них не пойдет, уж слишком холодна звезда; начнутся только ядерные реакции с литием и бериллием. Но этих элементов в природе мало, и «выгорают» они моментально. На какое-то время эти превращения поддержат температуру «звезды», а потом она начнет остывать, потому что никаких других источников тепла, кроме гравитационного, у нее не будет. Сейчас таких объектов мы знаем лишь несколько сотен. Они интересны, но их трудно исследовать. Диапазон их масс — от 13 до 78 масс Юпитера. Если начальная масса будет еще меньше, то получится не звезда, а планета, в которой термоядерные реакции вообще не начнутся.

## Красивая смерть

Когда у звезды заканчивается водород и начинается термоядерный синтез с участием накопившегося гелия, ее «термоядерный котел» многократно наращивает свою мощь, и она разбухает под давлением излучения, стабилизируясь при некотором (очень большом) размере. Но почему звезда раздувается не до бесконечности, что останавливает этот процесс? В качестве модели красного гиганта можно взять воздушный шарик: пока он не надут, он непрозрачен. А когда мы его надуваем, то же самое количество вещества распределяется по большей площади поверхности, и шарик становится прозрачным. Так и лучевое давление распирает звезду до тех пор, пока она не становится достаточно прозрачной, чтобы оно могло выйти наружу.

Результаты численных расчетов показывают, что поверхность красного гиганта вовсе не однородна: на ней выделяются какие-то большие «блямбочки». Они похожи на конвективные ячейки, но

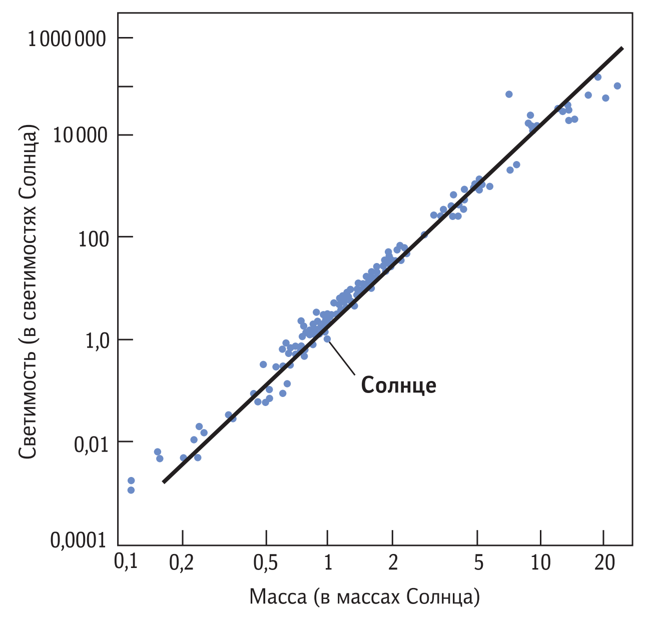



**Рис. 12.13.** **Зависимость «масса—светимость» для звезд главной последовательности. Для звезд типа Солнца $L \sim M^4$. Для звезд в широком диапазоне масс (0,2–20 $M_\odot$) $L \sim M^{3,5}$.**

у Солнца эти ячейки маленькие, а здесь почему-то сравнимы с размером звезды. Единственная пока звезда этого типа, у которой мы детально можем их сфотографировать, — это Бетельгейзе. И действительно, мы все время видим на ее поверхности темные и светлые пятна. Один из лучших портретов звезды Бетельгейзе, полученный с помощью интерферометра ближнего ИК-диапазона с базой 40 м на основе трех телескопов обсерватории Маунт-Хопкинс (Аризона), приведен на рис. 11.15. Чтобы проверить, связаны ли эти детали поверхности с конвекцией, сделали более совершенную 3D-модель (рис. 12.14). Гидростатически равновесный шар эволюционировать не будет, его состояние не будет меняться. Поэтому на его поверхность искусственно наложили малые возмущения, дали как бы исходный толчок. Визуально в самом начале это выглядит как мелкая рябь на поверхности шарика. Далее она развивается в конвективные ячейки, которые начинают расти, и вскоре каждая из них приобрета-

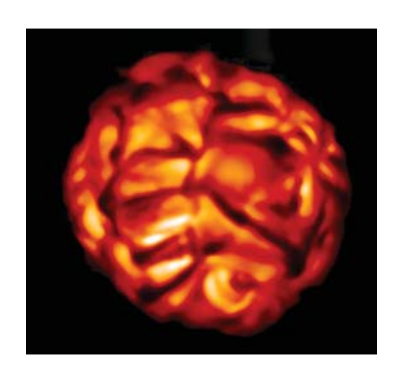


**Рис. 12.14.** **Результат цифрового моделирования конвективных процессов на Бетельгейзе.**

ет размер, сравнимый с радиусом звезды. Известно, что размер конвективных ячеек всегда сопоставим с глубиной слоя однородного флюида (жидкости или газа). Значит, полученный результат свидетельствует о том, что в атмосфере красного гиганта свойства (плотность, температура) почти не меняются с глубиной, она почти вся однородная.



**Рис. 12.15.** С. А. Жевакин.

На портретах Бетельгейзе в длинноволновых диапазонах излучения (см. рис. 11.15) видно, что звезда теряет вещество с поверхности, как всегда происходит на заключительных этапах жизни. При удалении от центра гравитация ослабевает, и получается, что звезда сбрасывает оболочку.

На нескольких последовательных фотографиях звездного неба бывает видно, что некоторые звездочки мигают, т. е. меняют свою яркость. Дело в том, что в ходе превращения в красный гигант некоторые звезды становятся неустойчивыми: то, сжимаясь, разогреваются, то, расширяясь, остывают, т. е. пульсируют, блеск их регулярно меняется (рис. 12.16). Не по синусоиде, конечно, но колебания вполне регулярные. Такие звезды называют цефеидами.

Человек, который первым понял физическую причину этого явления и описал механизм пульсации звезд, — отечественный радиофизик Сергей Жевакин, он работал в Нижнем Новгороде. Генерация энергии в ядре идет непрерывно, и излучение, доходя до слоя слабоионизованного вещества (в основном гелия), возбуждает его атомы. Они теряют электроны, и среда становится прозрачной. Фотоны быстро «выпрыгивают», вещество охлаждается, электроны постепенно возвращаются на свои места, сре-

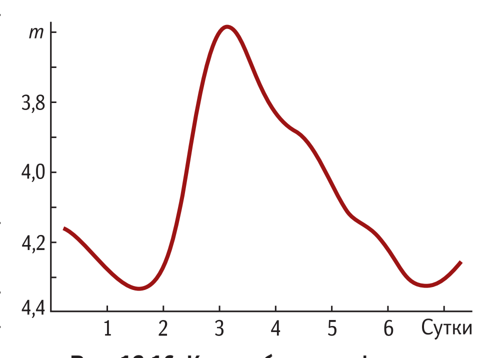



**Рис. 12.16.** Кривая блеска цефеиды.

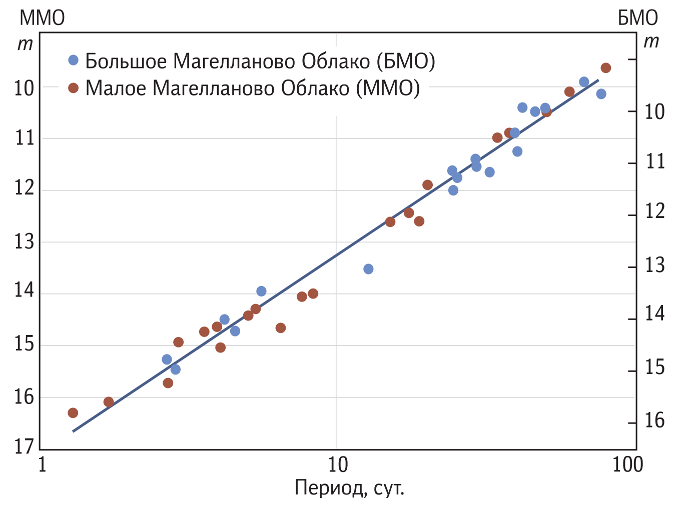



**Рис. 12.17.** Зависимость светимости цефеид от периода колебаний их блеска.

да снова становится непрозрачной и запирает излучение. Тогда оно опять начинает нагревать этот слой, и цикл замыкается. Получается своего рода двухтактный двигатель. Оказалось, что период колебаний таких звезд однозначно связан с их светимостью, и это позволяет использовать их в качестве индикатора расстояния (рис. 12.17).

Как уже было упомянуто, на последнем этапе жизни звезда сбрасывает оболочку, а ядро при этом остается на месте. Мы называем такие объекты планетарными туманностями. Термин происходит от того, что астрономам, наблюдавшим их в старые телескопы, они напоминали диски планет. «Хаббл» теперь фотографирует их с высоким разрешением.



**Рис. 12.18.** Сферическая планетарная туманность Эйбелл 39. Фото обсерватории WIYN (Аризона).



**Рис. 12.19.** Планетарная туманность NGC 6720 «Кольцо». Фото космического телескопа «Хаббл».



**Рис. 12.20.** Планетарная туманность NGC 7662. Фото космического телескопа «Хаббл».

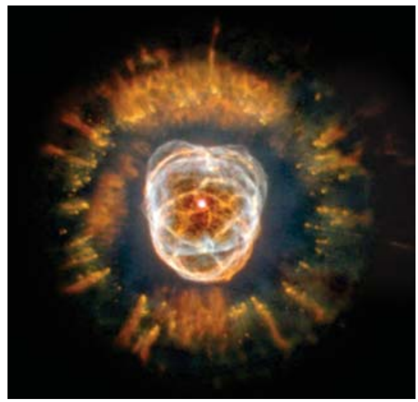


**Рис. 12.21.** Туманность NGC 2392 («Эскимос»). Фото космического телескопа «Хаббл».

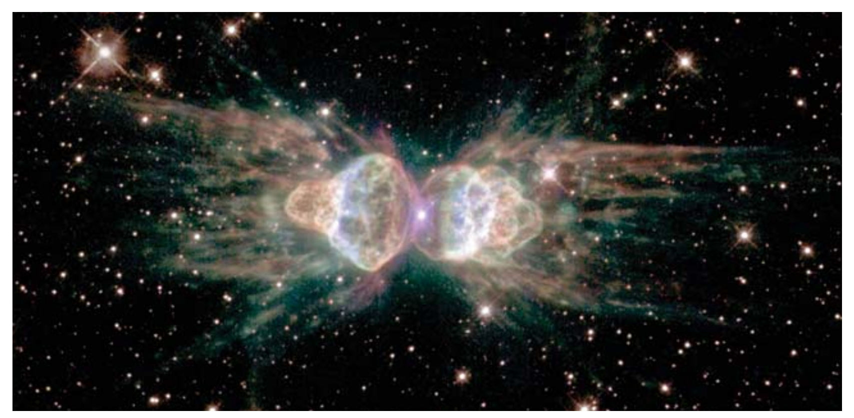


**Рис. 12.22.** Планетарная туманность «Муравей». Фото космического телескопа «Хаббл».

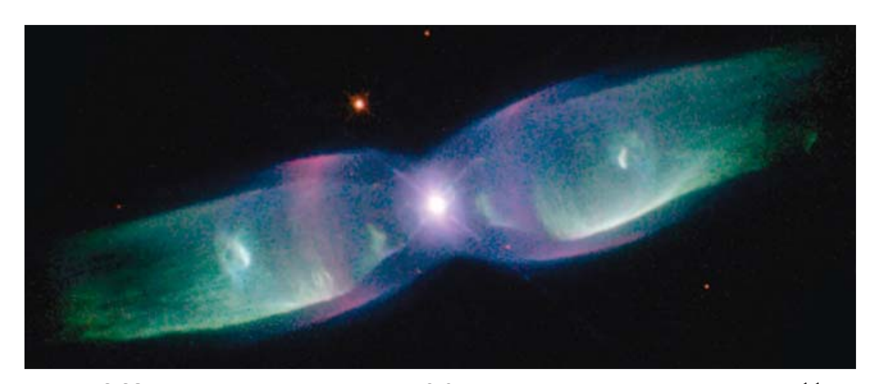


**Рис. 12.23.** Планетарная туманность М2-9. Фото космического телескопа «Хаббл».



**Рис. 12.24.** Туманность «Кошачий глаз». Фото космического телескопа «Хаббл».

Загадка планетарных туманностей в том, что они очень разнообразны. Физик-теоретик сказал бы, что поскольку звезда — шар, то сбрасывает она с себя вещество симметрично, и поэтому все планетарные туманности должны быть сферическими с ядром в центре (рис. 12.18). Однако так почему-то бывает не всегда: порой возникают весьма замысловатые округлые формы (рис. 12.19–12.21). Но это еще не предел фантазии природы: вот планетарная туманность Муравей (рис. 12.22). С, казалось бы, сферической звезды газ избирательно утекает в двух направлениях, а в остальных — нет (рис. 12.23). Ну и, наконец, апофеоз — туманность NGC 6543 Кошачий Глаз (рис. 12.24). Как звезда могла организовать вокруг себя вот такую красоту, сбрасывая газ? Тут нет никаких артефактов, это реальная фотография неба. В центре этого ажурного сооружения виден остаток звезды — ее ядро, оно нагревает и освещает оболочку. Физика создания этого космического чуда архитектуры пока не ясна — астрофизикам есть над чем работать.



# Краткий справочник

**АЛЬБЕДО** (лат. *albedo* белизна) — величина, характеризующая рассеивающую или отражательную способность поверхности тела. Выражается как доля падающего потока излучения или частиц, отраженная поверхностью тела. Различают несколько видов альбедо.

*Истинное альбедо*, или *ламбертово альбедо*, совпадающее с коэффициентом диффузного отражения, — это отношение потока, рассеянного плоским элементом поверхности во всех направлениях, к падающему на него потоку. Если поверхность освещается и наблюдается вертикально, то такое истинное альбедо называют нормальным. Нормальное альбедо чистого снега составляет около 1,0, а древесного угля — около 0,04.

Значение альбедо зависит от спектра падающего излучения и от свойств поверхности. Поэтому отдельно измеряют альбедо для разных спектральных диапазонов (оптическое, ультрафиолетовое, инфракрасное), поддиапазонов (визуальное, фотографическое) и даже для отдельных длин волн (монохроматическое альбедо).

В астрономии часто используют *геометрическое*, или *плоское*, альбедо — отношение освещенности у Земли, создаваемой планетой в полной фазе (т. е. ее блеска), к освещенности, которую создал бы плоский абсолютно белый экран того же размера, что и планета, отнесенный на ее место и расположенный перпендикулярно лучу зрения и солнечным лучам. Визуальное геометрическое альбедо Луны 0,12; Земли 0,367. В принципе, геометрическое альбедо может быть больше единицы (частично зеркальное отражение). Например, геометрическое альбедо Энцелада (спутник Сатурна) составляет 1,375±0,008.

Для расчета энергетического баланса планет используется *сферическое альбедо* (альбедо Бонда), введенное в 1861 г. американским астрономом Д. Ф. Бондом (1825–1865). Это отношение отраженного всей планетой потока излучения к падающему на нее потоку. Бондовское альбедо Земли 0,306, у лишенной атмосферы Луны оно составляет 0,067, у покрытой облаками Венеры — 0,77, а у покрытого снегом Энцелада — 0,99.

В теории переноса (рассеяния) излучения используется также понятие *единичного альбедо* — это отношение числа рассеянных во все стороны фотонов к числу падающих фотонов.

**АСТРОНОМИЧЕСКАЯ ЕДИНИЦА (а. е.)** — единица длины, практически равная среднему расстоянию между центрами Земли и Солнца, т. е. большой полуоси земной орбиты. 1 а. е. = 149 597 870 ± 2 км (в системе МАС 1976 г.). Обычно используется в астрономии при указании расстояний между объектами Солнечной системы и между звездами в двойных системах. В международных документах астрономическая единица обозначается как AU или au (от англ. *astronomical unit*).

Заметим, что такое определение астрономической единицы удовлетворяет не только любителей, но и большинство профессиональных астрономов. Однако специалисты по астрометрии и астродинамике предпочитают более точное определение, например такое: астрономическая единица — это исторически сложившаяся единица измерения расстояний в астрономии, равная 149 597 870 ± 2 км. При этом размер большой полуоси оскулирующей (т. е. мгновенной) орбиты Земли уже не рассматривается в качестве эталона длины, поскольку он действительно немного изменяется со временем под действием возмущений со стороны других планет. Разумеется, под «орбитой Земли» имеется в виду не траектория центра планеты Земля, а траектория барицентра (центра массы) системы Земля—Луна.

Кроме того, строго говоря, определение астрономической единицы как «среднего расстояния» тоже не совсем верно. Хотя бы потому, что при кеплеровском движении по эллипсу среднее по времени расстояние $\langle r \rangle$ не равно большой полуоси эллипса $a$, а равно $\langle r \rangle = a(1 + e^2/2)$, хотя при этом верно равенство $\langle 1/r \rangle = 1/a$.

При аксиоматическом подходе астрономическую единицу определяют как радиус круговой орбиты, на которой тело пренебрежимо малой массы в отсутствие возмущений совершает оборот вокруг Солнца за $2\pi/k$ суток, где $k$ — гравитационная постоянная Гаусса. Это расстояние чуть меньше, чем большая полуось орбиты Земли. Поскольку Гауссова гравитационная постоянная принята как константа, то действительно можно также сказать, что астрономическая единица — это исторически сложившаяся единица измерения расстояний в астрономии, равная 149 597 870 км. А большая полуось орбиты Земли в каждую эпоху немного отличается от этого значения.

Указанное выше значение астрономической единицы (149 597 870 ± ± 2 км) было получено на основе различных измерений прошлых лет и в 1976 г. принято Международным астрономическим союзом (МАС) как одна из производных постоянных в системе астрономических постоянных для стандартной эпохи J2000,0. Это значение рекомендовано для астрономических вычислений (чтобы сделать их взаимно сравнимыми), и рекомендация пока сохраняется.

Однако для вычисления траекторий полета межпланетных зондов и других высокоточных исследований требуется более высокая точность измерения астрономической единицы, поэтому значение 1 а. е. постоянно уточняется путем телеметрических измерений сигналов от самих межпланетных зондов и радиолокационных измерений расстояний до планет и астероидов. В настоящее время (2017 г.) значение астрономической единицы измерено со среднеквадратичной погрешностью 3 м и равно 149 597 870 700 ± 3 м. Это значение можно назвать «текущим». А большая полуось земной орбиты, фигурирующая в небесно-механических расчетах, составляет 149 598 261 км = 1,00000261 а. е. (эпоха J2000,0).

**ЗВЕЗДНАЯ ВЕЛИЧИНА** — безразмерная физическая величина, характеризующая освещенность, создаваемую небесным объектом вблизи наблюдателя. Субъективно ее значение воспринимается как блеск (у точечных источников) или яркость (у протяженных). При этом блеск одного источника указывают путем его сравнения с блеском другого, принятого за эталон. Такими эталонами обычно служат специально подобранные непеременные звезды. Звездную величину сначала ввели как указатель видимого блеска оптических звезд, но позже распространили и на другие диапазоны излучения: ИК, УФ. Шкала звездных величин логарифмическая, как и шкала децибелов. В шкале звездных величин разность на 5 единиц соответствует 100-кратному различию в потоках света от измеряемого и эталонного источников. Таким образом, разность на 1 звездную величину соответствует отношению потоков света в $(100)^{1/5} \approx 2{,}512$ раза.

Обозначают звездную величину латинской буквой «*m*» (от лат. *magnitudo* величина) в виде верхнего курсивного индекса справа от числа. Направление шкалы звездных величин обратное, т. е. чем больше значение, тем слабее блеск объекта. Например, звезда 2-й звездной величины ($2^m$) в 2,512 раза ярче звезды 3-й величины ($3^m$) и в $2{,}512 \times 2{,}512 \approx 6{,}310$ раза ярче звезды 4-й величины ($4^m$).

***Видимая звездная величина*** (*m*), или просто «звездная величина», указывает поток излучения вблизи наблюдателя, т. е. наблюдаемую яркость небесного источника, которая зависит не только от реальной мощности излучения объекта, но и от расстояния до него. Шкала видимых величин ведет начало от звездного каталога Гиппарха (до 161 — около 126 г. до н. э.), в котором все видимые глазом звезды впервые были разбиты на 6 классов по яркости. У звезд Ковша Большой Медведицы блеск около $2^m$, у Веги — около $0^m$. У особо ярких светил значение видимой звездной величины отрицательно: у Сириуса — около $-1{,}5^m$ (т. е. поток света от него в 4 раза больше, чем от Веги), а блеск Венеры в некоторые моменты почти достигает $-5^m$ (т. е. поток света почти в 100 раз больше, чем от Веги). Под-

черкнем, что видимая звездная величина может быть измерена как невооруженным глазом, так и с помощью телескопа; как в визуальном диапазоне спектра, так и в других (фотографическом, УФ, ИК). Таким образом, в этом термине «видимая» (англ. *apparent*) означает «наблюдаемая», «кажущаяся» и не имеет отношения конкретно к человеческому глазу.

Для удобства сравнения измерений, проведенных на разных обсерваториях при разных зенитных расстояниях звезд, публикуемые в статьях и каталогах значения видимой звездной величины обычно исправлены за поглощение в атмосфере («вынесены за атмосферу»).

***Абсолютная звездная величина (M)*** указывает, какую видимую звездную величину имело бы светило, если бы расстояние до него составляло 10 пк и при этом отсутствовало бы межзвездное поглощение света. Таким образом, абсолютная звездная величина, в отличие от видимой, позволяет сравнивать истинные светимости небесных объектов (в заданном диапазоне спектра).

Что касается спектральных диапазонов, то существует множество систем звездных величин, различающихся выбором конкретного диапазона измерения. При наблюдении глазом (невооруженным или через телескоп) измеряется *визуальная звездная величина* ($m_V$). По изображению звезды на обычной фотопластинке, полученному без дополнительных светофильтров, измеряется *фотографическая звездная величина* ($m_P$).

Поскольку фотоэмульсия чувствительна к синим лучам и нечувствительна к красным, на фотопластинке более яркими (чем это кажется глазу) получаются голубые звезды. Однако и с помощью фотопластинки, используя ортохроматическую эмульсию и желтый светофильтр, получают так называемую фотовизуальную шкалу звездных величин ($m_{PV}$), которая практически совпадает с визуальной.

Сопоставляя яркости источника, измеренные в различных диапазонах спектра, можно узнать его цвет, оценить температуру поверхности (если это звезда) или альбедо (если планета), определить степень межзвездного поглощения света и другие важные характеристики. Поэтому разработаны стандартные фотометрические системы, содержащие от двух до дюжины и более спектральных диапазонов, в основном определяемых подбором светофильтров. Наиболее популярна трехцветная система UBV: ультрафиолетовый (Ultraviolet), синий (Blue) и желтый (Visual). При этом желтый диапазон очень близок к фотовизуальному ($V \approx m_{PV}$), а синий — к фотографическому ($B \approx m_P$). При записи значений звездных величин в определенных диапазонах («фильтрах») обычно используют такую форму: $m_P = 5$, $V = 11$, $U = 7{,}8$ и т. п., не употребляя при цифре верхний индекс «*m*», поскольку и так ясно, о каких единицах измерения идет речь.

Кроме спектрально-чувствительных приемников, существуют болометры — интегральные приемники излучения. Поток излучения, просуммированный по всем диапазонам спектра, дает *болометрическую звездную величину* ($m_b$ или $m_{bol}$) и позволяет (если известно расстояние до источника и степень межзвездного поглощения) вычислить светимость объекта. Знание видимой болометрической величины позволяет вычислить приходящий от источника поток энергии:

$$f = 2{,}5 \cdot 10^{-8} \times \mathrm{dex}\{-0{,}4m_b\}\ \text{Вт/м}^2.$$

Вычисленное (через расстояние и поглощение) значение абсолютной болометрической величины ($M_b$ или $M_{bol}$) легко перевести в светимость (т. е. мощность излучения) звезды:

$$L = 3{,}0 \times 10^{28} \times \mathrm{dex}\{-0{,}4M_b\}\ \text{Вт}.$$

Для Солнца $m_b = -26{,}83$ и $M_b = 4{,}74$. Это соответствует светимости Солнца $L_\odot = 3{,}85 \cdot 10^{26}$ Вт и потоку его излучения у Земли $f_\odot = 1369$ Вт/м$^2$.

**КОРИЧНЕВЫЕ КАРЛИКИ (бурые карлики)** — космические тела, занимающие по своим массам промежуточное положение между звездами и планетами. Коричневыми карликами принято называть объекты с массами приблизительно от 0,01 до 0,08 масс Солнца ($M_\odot$). От нормальных звезд они отличаются тем, что температура в их недрах никогда не достигает значений, необходимых для протекания важнейшей термоядерной реакции — превращения легкого изотопа водорода ($^1$H) в гелий ($^4$He), которая обеспечивает длительное свечение обычных звезд. Именно этим и определяется верхняя граница их массы: (0,075–0,08) $M_\odot$. Но по сравнению с планетами, вообще не способными к термоядерному синтезу, коричневые карлики на начальном этапе своей жизни все же разогреваются настолько, что «сжигают» в термоядерных реакциях некоторые редкие элементы, например тяжелый изотоп водорода — дейтерий ($^2$H), а также литий. Это делает их на короткое время похожими на звезды. Нижняя граница массы коричневых карликов, отделяющая их от планет, имеет значение около 13 масс Юпитера ($\approx 0{,}01M_\odot$).

Температура поверхности коричневых карликов обычно не превышает 2000 К, а у многих даже близка к 1000 К. Поэтому они имеют темно-красный или даже инфракрасный цвет. Отсюда и английское название этих объектов — *brown dwarf*, которое некоторые авторы переводят на русский язык как «бурый карлик». Для таких относительно холодных объектов введены новые спектральные классы: L (1300–2000 К), T (700–1300 К) и Y (<600 К). Светимость коричневых карликов $L \sim (10^{-4}–10^{-5})L_\odot$. Они излучают энергию за счет медленного сжатия ядра. Характерная длительность излучения — около 15 млн лет. Затем сжатие останавли-

вается, и равновесие объекта поддерживается давлением вырожденного электронного газа, препятствующего гравитационному сжатию. Остывая, коричневые карлики превращаются в «черные карлики». Первый коричневый карлик был обнаружен в 1996 г. После этого у астрономов появилась надежда, что остывшие коричневые карлики, если они многочисленны, могут играть роль скрытой массы Галактики. Но предварительные подсчеты показывают, что их недостаточно для решения проблемы темного вещества.

До середины 1990-х гг. граница между звездами и планетами представлялась вполне определенной. Наиболее массивной планетой считался Юпитер, масса которого составляет всего 0,001 $M_\odot$, а наименьшие среди известных звезд были значительно крупнее: они имели массу около 0,1 $M_\odot$. Однако после 1995 г. были обнаружены экзопланеты во много раз массивнее Юпитера и близкие к ним по массе мини-звезды. Это потребовало точного определения понятий «звезда» и «планета» на основе физических различий в их эволюции.

Поскольку характерным признаком звезды служат протекающие в ее недрах термоядерные реакции, именно их отсутствие было положено в основу определения планеты. Согласно Б. Р. Оппенгеймеру и др. (2000), планета — это объект, в котором за всю его историю реакции ядерного синтеза не происходят ни в каком виде. Если же на каком-либо этапе эволюции мощность термоядерного синтеза была сравнима со светимостью объекта, то он достоин называться звездой.

Расчеты показывают, что в звездах с массой менее 0,07–0,08 $M_\odot$ температура так низка, что термоядерные реакции с участием легкого изотопа водорода (т. е. реакции pp-цикла) практически не происходят. Это критическое значение массы звезды называют границей возгорания водорода, или *пределом Кумара*. Единственным долговременным источником энергии менее массивных звезд служит их гравитационное сжатие. Однако в процессе этого сжатия каждая протозвезда проходит короткий этап горения дейтерия. Этот тяжелый изотоп водорода вступает в термоядерную реакцию при более низкой температуре, чем легкий водород, потому что реакция с дейтерием ($^2$D + p → $^3$He + γ) происходит под действием электромагнитного, а не слабого взаимодействия. Необходимые для этой реакции условия возникают в звездах с массой более 0,013 солнечной (что всего в 14 раз больше массы Юпитера). Но содержание дейтерия в космическом газе ничтожно (0,001%), сгорает он быстро и слабо влияет на светимость звезды; основным источником ее энергии в этот период все равно остается гравитационное сжатие.

Звезды наименьшей массы, обладающие ядерным источником энергии, очень экономно расходуют запас водорода: например, звезда с мас-

сой 0,085 $M_{\odot}$ может поддерживать свою невысокую светимость (около 0,04% от солнечной) в течение 6000 млрд лет, что в 440 раз больше нынешнего возраста Вселенной! Но коричневые карлики с массой чуть ниже предела Кумара практически лишены ядерной энергии, поэтому после быстрого сгорания дейтерия и остановки гравитационного сжатия они быстро остывают и становятся невидимыми — всего за несколько миллиардов лет. Поэтому в Галактике может быть много холодных и совершенно невидимых коричневых карликов.

**ЛУЧЕВАЯ СКОРОСТЬ** — проекция вектора скорости объекта на луч зрения наблюдателя; ее считают положительной, если объект удаляется от наблюдателя, и отрицательной, если приближается. Например, измеряя смещение линий в спектрах небесных тел, определяют скорость их приближения или удаления (эффект Доплера), т. е. измеряют компонент скорости, направленный по лучу зрения. Термин «лучевая скорость», как правило, используют астрономы; физики обычно называют ее «радиальной скоростью».

**МЕСЯЦ** — промежуток времени, близкий к периоду обращения Луны вокруг Земли. В солнечных календарях год делят на календарные месяцы разной продолжительности: в григорианском календаре год состоит из 12 месяцев продолжительностью от 28 до 31 суток, не согласованных с фазами Луны.

***Синодический месяц*** — период смены лунных фаз, который, в частности, служит основой лунных календарей. В среднем равен 29 сут 12 час 44 мин 02,78 с = 29,5305882 сут, но меняется от 29,25 сут до 29,83 сут вследствие эллиптичности лунной орбиты.

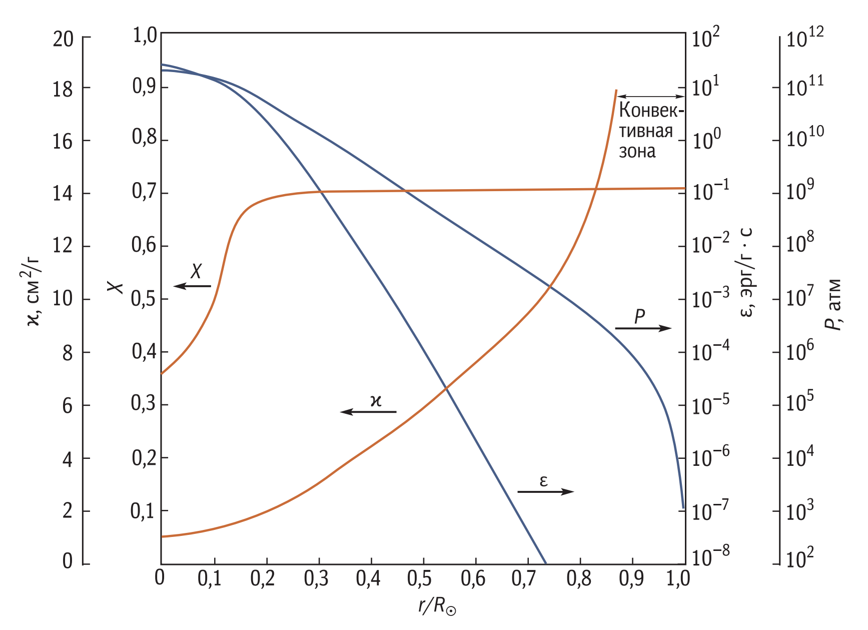
***Сидерический*** (т. е. звездный) ***месяц*** — промежуток времени, за который Луна совершает оборот вокруг Земли и возвращается в ту же точку небесной сферы относительно звезд; равен периоду вращения Луны (27 сут 07 час 43 мин 11,47 с = 27,321661 сут).

***Тропический месяц*** — период возвращения Луны к той же эклиптической долготе. Это понятие практически не употребляется.

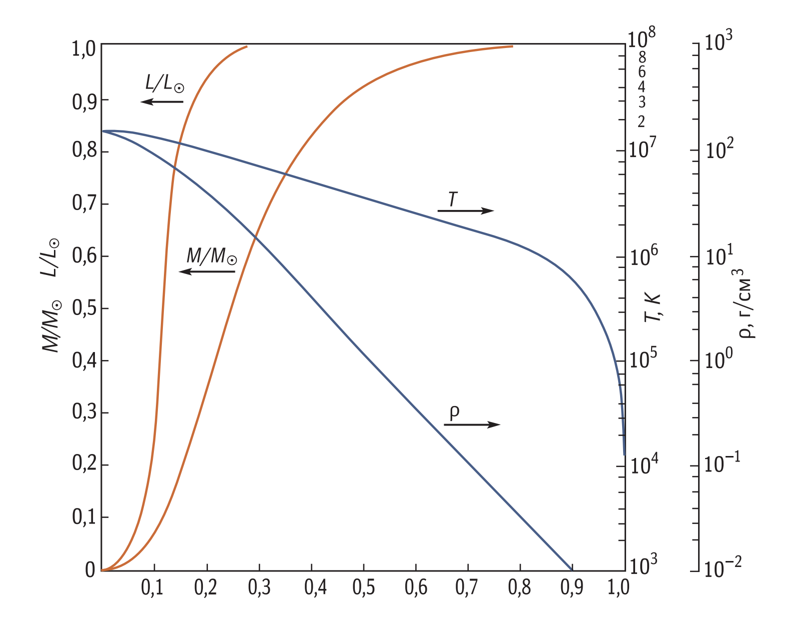
***Аномалистический месяц*** — промежуток времени между последовательными прохождениями Луны через перигей ее орбиты (27,5546 сут).

***Драконический месяц*** — промежуток времени между последовательными прохождениями Луны через один и тот же узел ее орбиты на эклиптике (27,2122 сут); имеет значение в теории затмений.

**МОДЕЛЬ ЗВЕЗДЫ** — результат теоретического расчета (как правило, численного) физических условий внутри звезды заданной массы и химического/изотопного состава. Эволюционная модель звезды демонстрирует




**Свойства солнечного** вещества, определяемые локальными значениями основных параметров. Доля водорода по массе ($X$) и давление ($P$) заимствованы у Sears, 1964; коэффициент непрозрачности ($\varkappa$) — у Weymann, 1957; удельная (на единицу массы) скорость генерации энергии ($\varepsilon$) — у Гибсона, 1977.



**Стандартная модель Солнца**
**(Bahcall J. N. et al. 1982 Rev. Mod. Phys. Vol. 54. P. 767)**

$M_r$ и $L_r$ — масса и светимость внутри радиуса $r$ вокруг центра звезды; $T$, $\rho$, $X$ и $\varkappa$ — температура, плотность, массовая доля водорода и коэффициент непрозрачности на расстоянии $r$ от центра звезды.

| $M_r$, $M_\odot$ | $r$, $R_\odot$ | $T$, $10^6$ K | $\rho$, г/см$^3$ | $L_r$, $L_\odot$ | $X$ | $\varkappa$, см$^2$/г |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0,0 | 0,00 | 15,5 | 156,3 | 0,00 | 0,355 | 1,1 |
| 0,0099 | 0,046 | 14,8 | 133,9 | 0,079 | 0,417 | 1,2 |
| 0,0385 | 0,076 | 13,8 | 108,1 | 0,264 | 0,497 | 1,3 |
| 0,1038 | 0,113 | 12,4 | 78,9 | 0,555 | 0,592 | 1,4 |
| 0,1620 | 0,138 | 11,4 | 63,2 | 0,718 | 0,641 | 1,6 |
| 0,2100 | 0,156 | 10,8 | 53,6 | 0,809 | 0,668 | 1,7 |
| 0,2580 | 0,173 | 10,2 | 45,7 | 0,874 | 0,688 | 1,8 |
| 0,3100 | 0,190 | 9,60 | 38,5 | 0,921 | 0,702 | 1,9 |
| 0,3900 | 0,217 | 8,77 | 29,4 | 0,964 | 0,716 | 2,1 |
| 0,4700 | 0,245 | 8,00 | 22,1 | 0,986 | 0,724 | 2,4 |
| 0,5500 | 0,275 | 7,27 | 16,1 | 0,996 | 0,728 | 2,8 |
| 0,6900 | 0,336 | 6,03 | 8,03 | 1,000 | 0,731 | 3,5 |
| 0,8300 | 0,430 | 4,65 | 2,85 | 1,000 | 0,732 | 4,7 |
| 0,9264 | 0,554 | 3,40 | 0,773 | 1,000 | 0,732 | 8,0 |
| 0,9602 | 0,641 | 2,72 | 0,338 | 1,000 | 0,732 | 12,2 |
| 0,9784 | 0,718 | 2,12 | 0,169 | 1,000 | 0,732 | 16,8 |
| 0,9954 | 0,849 | 0,95 | 0,050 | 1,000 | 0,732 | Конвек. |
| 1,00 | 1,00 | 0,0058 | $2,8\cdot10^{-7}$ | 1,00 | 0,732 | 0,3 |

изменение всех этих характеристик со временем. Модели звезд различаются степенью учета реальных факторов. Простейшие (одномерные) модели представляют звезду как сферически симметричный объект, физические параметры и химический состав в недрах которого изменяются только вдоль радиуса. Двумерные модели учитывают вращение звезды.

Возможен также учет перемешивания вещества, наличия магнитного поля, потери массы в виде звездного ветра с поверхности звезды. Трехмерные модели могут учитывать влияние внешнего источника гравитации и излучения (т. е. влияние близкой соседней звезды).

**Распределение основных параметров в модели внутреннего строения современного Солнца, достигшего возраста $4{,}5\cdot10^9$ лет. $T$ и $\rho$ — температура и плотность на расстоянии $r$ от центра, $M$ и $L$ — масса и светимость внутри радиуса $r$. Начальный химический состав, практически неизменный в течение эволюции за пределами ядра ($r > 0{,}25\ R_\odot$), в массовых долях в этой модели составляет: H — 0,708, He — 0,272, тяжелые элементы — 0,020. Плотность и температура в центре: $\rho_c$ = 158 г/см$^3$ и $T_c = 15{,}7\cdot10^6$ K. Стрелки указывают расположение шкал для соответствующих параметров. (По: Sears, 1964.)**

**НЕБЕСНАЯ СФЕРА** — воображаемая сфера произвольного радиуса, в центре которой располагается наблюдатель, внутри которой находятся все наблюдаемые небесные объекты и на поверхность которой, с точки зрения наблюдателя, они спроецированы. Небесная сфера применяется в астрономии как вспомогательная математическая поверхность для изучения взаимного расположения и движения космических объектов. Координаты объектов на небесной сфере (например, прямое восхождение и склонение) задаются путем продления линии, проведенной из центра небесной сферы через объект до пересечения с поверхностью сферы.

На небесной сфере выделяют: большие круги (их центры совпадают с центром сферы); малые круги (их центры не лежат в центре сферы); математический горизонт; зенит; надир; точки Юг, Восток, Север и Запад; полюсы мира, небесный экватор и меридиан; эклиптику; точки солнцестояний и равноденствий; суточные параллели — малые круги, параллельные экватору, которые вследствие суточного вращения Земли описывают все небесные светила на небесной сфере.

**ПАРАЛЛАКС** — видимое смещение более близкого объекта на фоне значительно более далеких при перемещении наблюдателя с одного конца некоторой базы на другой ее конец. Например, перемещение Земли по орбите вызывает заметный годичный параллакс у близких звезд: видимое положение звезды описывает, в общем случае, эллипс вокруг среднего положения звезды.

Параллактический угол объекта ($p$) равен половине его максимального параллактического смещения, т. е. равен большой полуоси параллактического эллипса. Проще говоря, он равен углу, под которым от объекта виден радиус земной орбиты (1 а. е.). Даже у ближайших звезд значение $p < 1''$. Если угол параллакса $p$ мал и выражен в радианах, а длина базы, перпендикулярной направлению на объект, составляет $B$, то расстояние до объекта с большой точностью равно $D = B/p$. При фиксированной базе сам параллактический угол может служить мерой расстояния до объекта. Поскольку базой годичного параллакса служит расстояние 1 а. е., то, измеряя параллакс в секундах дуги, получим простое выражение для расстояния до звезды в парсеках: $D = 1/p$. По определению, парсек — это расстояние до объекта, годичный параллакс которого равен секунде дуги; «парсек» = «параллакс» + «секунда».

Параллаксы, определенные по параллактическому смещению светила, называют *тригонометрическими*. Но часто в виде параллактического угла выражают расстояние до светила, найденное иным, не геометрическим способом. Так появились динамический, спектральный, энергетический, групповой, статистический параллаксы.

**Ближайшие к Солнцу звезды (до 4,1 пк)**

Координаты J2000.0; параллакс (*p*) в угловых секундах.

| Звезда | α | δ | $m_V$ | Спектр | *p* | $M_V$ | $L_V/L_\odot$ | Примечания |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Проксима Кентавра | $14^h29{,}7^m$ | −62°41′ | $11{,}1^m$ | M5,5Ve | 0,769″ | $15{,}5^m$ | 0,00005 | α Cen C |
| α Кентавра A | 14 39,6 | −60 50 | 0,0 | G2V | 0,742 | 4,3 | 1,6 | HD 128620 |
| α Кентавра B | 14 39,6 | −60 50 | 1,4 | K1V | 0,742 | 5,7 | 0,44 | HD 128621 |
| Звезда Барнарда | 17 57,8 | +04 42 | 9,5 | M5V | 0,549 | 13,2 | 0,00043 | Gliese 699 |
| Вольф 359 | 10 56,5 | +07 01 | 13,5 | M6,5Ve | 0,419 | 16,6 | 0,00002 | Gliese 406, CN Leo |
| BD+36°2147 | 11 03,3 | +35 58 | 7,5 | M2,1V | 0,392 | 10,5 | 0,0055 | Lalande 21185 |
| Сириус A | 6 45,1 | −16 43 | −1,4 | A1Vm | 0,379 | 1,5 | 22,3 | HD 48915 |
| Сириус B | 6 45,1 | −16 43 | 8,4 | DA2 | 0,379 | 11,3 | 0,0025 | Белый карлик |
| Лейтен 726-8 A | 1 39,0 | −17 57 | 12,6 | M5,5Ve | 0,373 | 15,4 | 0,000058 | BL Cet |
| Лейтен 726-8 B | 1 39,0 | −17 57 | 13,0 | M5,5Ve | 0,373 | 15,8 | 0,00004 | UV Cet |
| Росс 154 | 18 49,8 | −23 50 | 10,4 | M3,6Ve | 0,336 | 13,0 | 0,00054 | Gliese 729, V1216 Sgr |
| Росс 248 | 23 41,9 | +44 10 | 12,3 | M5,5Ve | 0,316 | 14,8 | 0,00011 | Gliese 905, HH And |
| ε Эридана | 3 32,9 | −09 27 | 3,7 | K2V | 0,311 | 6,2 | 0,29 | HIP 16537, HD 22049 |
| CD−36°15693 | 23 05,9 | −35 51 | 7,4 | M2V | 0,304 | 9,8 | 0,011 | Lacaille 9352 |
| Росс 128 | 11 47,7 | +00 48 | 11,1 | M5V | 0,300 | 13,5 | 0,00034 | Gliese 447, FI Vir |
| Лейтен 789-6 = ABC | 22 38,6 | −15 18 | 12,3 | M5,5V | 0,290 | 14,6 | 0,00012 | EZ Aquarii |
| 61 Лебедя A | 21 06,9 | +38 45 | 5,2 | K5V | 0,287 | 7,5 | 0,086 | HD 201091 |
| 61 Лебедя B | 21 06,9 | +38 44 | 6,1 | K7V | 0,285 | 8,3 | 0,039 | HD 201092 |
| Процион A | 7 39,3 | +05 14 | 0,4 | F5IV-V | 0,286 | 2,7 | 7,2 | α CMi, HD 61421 |
| Процион B | 7 39,3 | +05 14 | 10,7 | DF | 0,286 | 13,0 | 0,00054 | Белый карлик |
| BD+59°1915 A | 18 42,8 | +59 38 | 8,9 | M3,5V | 0,280 | 11,2 | 0,0029 | ADS 11632 AB |
| BD+59°1915 B | 18 42,8 | +59 38 | 9,7 | M4V | 0,284 | 12,0 | 0,0014 | Struve 2398AB |
| Groombridge 34A | 0 18,4 | +44 01 | 8,1 | M2V | 0,280 | 10,3 | 0,0063 | GX And, BD+43°44 A |
| Groombridge 34B | 0 18,4 | +44 01 | 11,1 | M4V | 0,280 | 13,3 | 0,00039 | GQ And, BD+43°44 B |
| G 51-15 | 8 29,8 | +26 47 | 14,8 | M6,5Ve | 0,276 | 17,0 | 0,000013 | G = Giclas, DX Cnc |
| ε Ind = A, Ba, Bb | 22 03,4 | −56 47 | 4,7 | K4Ve | 0,276 | 6,9 | 0,15 | Ba, Bb – кор. карлики |
| τ Cet | 1 44,1 | −15 56 | 3,5 | G8V | 0,274 | 5,7 | 0,45 | HIP 8102, HD 10700 |
| Лейтен 372-58 | 3 36,0 | v44 31 | 13,0 | M4,5V | 0,273 | 15,2 | 0,00007 | GJ1061, LHS 1565 |
| Лейтен 725-32 | 1 12,5 | −17 00 | 12,1 | M5,5Ve | 0,269 | 14,3 | 0,00017 | Gl 54.1, YZ Cet |
| Звезда Лейтена | 7 27,4 | +05 14 | 9,8 | M4V | 0,263 | 12,0 | 0,0013 | BD+5°1668, Gl 273 |
| Звезда Тигардена | 2 53,0 | +16 53 | 15,4 | M6,5V | 0,259 | 17,5 | 0,000008 | SO025300.5+165258 |
| SCR 1845-6357 = A, B | 18 45,1 | −63 58 | 17,4 | M8,5V | 0,259 | 19,4 | 0,000002 | B – коричн. карлик |
| Звезда Каптейна | 5 11,7 | −45 01 | 8,9 | M1V | 0,255 | 10,9 | 0,0037 | CD-45°1841 |
| CD-39°14192 | 21 17,3 | −38 52 | 6,7 | M2Ve | 0,253 | 8,7 | 0,028 | AX Mic, Lacaille 8760 |
| Крюгер 60 A | 22 28,0 | +57 42 | 9,8 | M3,5V | 0,248 | 11,8 | 0,002 | HD 239960 |
| Крюгер 60 B | 22 28,0 | +57 42 | 11,4 | M4,0Ve | 0,248 | 13,4 | 0,00041 | DO Cep, Gl 860B |
| DEN 1048-3956 | 10 48,2 | v39 56 | 17,4 | M8,5V | 0,248 | 19,4 | 0,000002 | |
| Росс 614 A | 6 29,4 | −02 49 | 11,2 | M4,5Ve | 0,244 | 13,1 | 0,00051 | HIP 30920, Gl 234A |
| Росс 614 B | 6 29,4 | −02 49 | 14,2 | M5,5V | 0,244 | 16,2 | 0,00003 | Gl 234B, V577 Mon |

Движение наблюдателя, вызванное суточным вращением Земли, вызывает изменение видимого положения близких объектов, располагающихся в пределах Солнечной системы. Угол между направлениями, в которых светило было бы видно из центра Земли и из какой-либо точки на его поверхности, называют *суточным параллаксом* светила (иногда его называют *геоцентрическим параллаксом — geocentric parallax*). Из-за вращения Земли суточный параллакс любого светила (кроме находящихся в полюсах мира) для любого наблюдателя (кроме находящихся на полюсах Земли) является функцией времени. Для светила, находящегося в момент наблюдения в зените, суточный параллакс равен нулю. Если светило наблюдается на горизонте, то его суточный параллакс принимает максимальное значение и называется *горизонтальным параллаксом*. Фактически это угол, под которым от объекта виден радиус Земли. Горизонтальный параллакс у всех тел Солнечной системы невелик: у Луны в среднем 57′, у Солнца 8,794″, у всех планет он меньше 1′.

**ПАРНИКОВЫЙ ЭФФЕКТ** — повышение температуры поверхности планеты, вызванное тем, что атмосфера прозрачна для приходящего солнечного излучения, но при этом непрозрачна для уходящего с планеты инфракрасного излучения. Температура поверхности растет до тех пор, пока не установится баланс этих тепловых потоков. Источником непрозрачности атмосферы для ИК-излучения обычно служат пары воды ($H_2O$) и двуокись углерода ($CO_2$). Парниковый эффект атмосферы особенно сильно проявляется на Венере, имеющей вследствие этого высокую температуру поверхности (737 K при эффективной температуре планеты около 240 K). Менее сильно парниковый эффект проявляется на Земле, доводя ее среднюю температуру до 288 K при эффективной около 250 K.

**РАВНОДЕНСТВИЕ** — момент прохождения центра Солнца в его видимом движении по небесной сфере через небесный экватор. Равноденствие происходит 20–21 марта (весеннее равноденствие) и 22–23 сентября (осеннее равноденствие). В это время продолжительность дня и ночи одинакова. Солнце восходит в точке востока и заходит в точке запада.

**СОЛНЦЕСТОЯНИЕ** — прохождение Солнца через точки эклиптики, максимально удаленные от небесного экватора. Эти точки называют *точками солнцестояния*.

Различают летнее и зимнее солнцестояния. В эти моменты высота Солнца над горизонтом в полдень соответственно максимальна или минимальна. В эти даты на Земле наблюдается самый длинный или самый короткий световой день (разумеется, в течение суток; многосуточные полярные дни не в счет). В Северном полушарии летнее солнцесто-

яние приходится на 20, 21 или 22 июня, а зимнее — на 21 или 22 декабря (в Южном полушарии — наоборот). Даты солнцестояния в разные годы могут различаться на 1–2 дня вследствие високосного сдвига. По традиции терминология ориентируется на Северное полушарие: июньское событие по всей Земле называют летним солнцестоянием, соответствующую точку эклиптики — точкой летнего солнцестояния, а декабрьское событие — зимним солнцестоянием и точку эклиптики — точкой зимнего солнцестояния.

В астрономии момент летнего солнцестояния принимается за начало лета, а момент зимнего солнцестояния — за начало зимы (в Северном полушарии). Эклиптическая долгота Солнца в эти моменты — соответственно 90° и 270°. В средних широтах в течение астрономической зимы и весны Солнце каждый день кульминирует в полдень все выше и выше над горизонтом, а в день летнего солнцестояния «останавливается» и изменяет свое движение на обратное. Летом и осенью (с 21 июня по 21 декабря) оно каждый день кульминирует все ниже и ниже. В конце концов в момент зимнего солнцестояния Солнце вновь «останавливается», изменяет свое движение на обратное и начинает подниматься. В течение нескольких дней до и после моментов солнцестояния высота Солнца в полдень почти не меняется, т. е. светило почти не меняет своего склонения. Отсюда и происходит название явлений — солнцестояния. Из наблюдений высоты Солнца в периоды солнцестояний можно определить наклон плоскости эклиптики к плоскости небесного экватора: он равен половине углового расстояния между точками летнего и зимнего солнцестояний.

**ТЕОРЕМА ВИРИАЛА** — теорема механики о связи между средним значением суммарной кинетической энергии системы частиц, движущихся в ограниченной области пространства, и действующими в этой системе силами. Установлена нем. физиком Р. Клаузиусом (1870). В астрономии существен случай гравитационных сил, при этом теорема вириала формулируется так: для всякого гравитационно связанного тела (системы) его средняя по времени потенциальная гравитационная энергия составляет

$$U_G = -2E_{кин}, \qquad (1)$$

где $E_{кин}$ — средняя по времени кинетическая энергия движения частиц тела (системы). Часто теорему вириала формулируют так: у стабильной гравитационно связанной системы частиц полная кинетическая энергия составляет (по модулю) половину потенциальной энергии.

Следует подчеркнуть, что в выражение (1) не входит внутренняя энергия частиц (например, энергия их вращения или внутренняя энергия атомов или молекул, если рассматривается газ).

Применение этой теоремы в астрономии обусловлено тем, что она позволяет через величину гравитационной энергии связать массу системы с кинетической энергией частей этой системы (в системе отсчета, относительно которой система как целое неподвижна). Поскольку гравитационная энергия системы $U_G$ по порядку величины составляет $-GM^2/R$, где $M$ — масса системы, $R$ — ее размер (радиус), $G$ — гравитационная постоянная, а средняя кинетическая энергия системы

$$E_{кин} = \frac{Mv_{ср}^2}{2},$$

где $v_{ср}^2$ — среднеквадратичная скорость членов системы, то из формулы (1) следует:

$$M \approx \frac{v_{ср}^2 R}{G}. \quad (2)$$

Если из наблюдений известны $v_{ср}^2$ и $R$, то выражение (2) позволяет оценить массу системы. Этот метод применим, например, для оценки масс звездных скоплений, галактик и компактных скоплений галактик. При рассмотрении строения звезд теорема вириала позволяет оценить среднюю температуру звезды. Для этого в формулу (2) подставляют значение среднеквадратичной скорости, выраженное через температуру:

$$v_{ср}^2 = \frac{3kT}{m},$$

где $m$ — масса частицы газа. Тогда из (2) следует:

$$T = \frac{GmM}{3kR}. \quad (3)$$

Полная энергия звезды, как следует из (1),

$$E = E_{кин} + U_G = -E_{кин} = \frac{U_G}{2}. \quad (4)$$

Из (4) видно, что $\Delta E = -\Delta E_{кин}$, т. е. сообщение звезде энергии уменьшает кинетическую энергию ее частиц и, наоборот, излучение энергии приводит к росту $E_{кин}$ и температуры звезды. Если источником энергии звезды служит ее постепенное сжатие под действием сил гравитации (это соответствует определенным этапам эволюции звезд), то выделяющаяся гравитационная энергия распределяется следующим образом. Половина ее, согласно (1), идет на увеличение $E_{кин}$ и температуры звезды:

$$-\frac{\Delta U_G}{2} = \Delta E_{кин}.$$

Вторая половина $\Delta U_G$ идет на излучение:

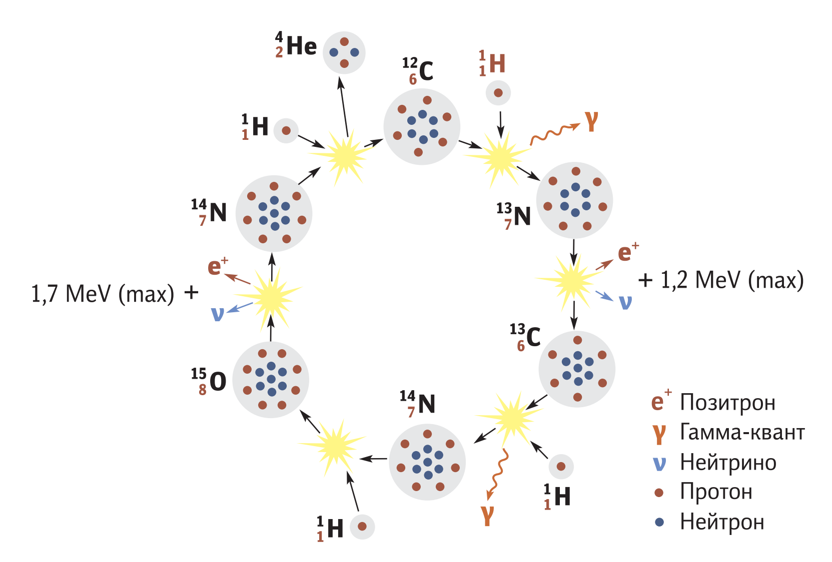
$$\Delta E_{изл} = -\Delta E_{кин} = \frac{\Delta U_G}{2}.$$

**ТЕРМИНАТОР** — граница между дневным и ночным полушариями Луны, планеты или естественного спутника планеты. У идеального шара в проекции на видимый диск планеты терминатор имеет форму половины эллипса, соединяющего концы его большой оси; в предельных случаях это полукруг или прямая линия. У реальных планет из-за неровности их поверхности терминатор при его наблюдении в телескоп демонстрирует сложную форму, особенно в областях с пересеченным рельефом (горы, каньоны). В области терминатора солнечные лучи падают под малым углом к поверхности планеты, образуя длинные тени. Это облегчает астроному изучение рельефа поверхности.

**ТЕРМОЯДЕРНАЯ РЕАКЦИЯ** — элементарная ядерная реакция, происходящая в ходе термоядерного синтеза в горячей плазме, частицы которой хаотически распределены по скоростям (в отличие от частиц, разогнанных в ускорителе).

**ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ** — цепочка ядерных реакций, происходящих в горячей плазме и приводящих к слиянию легких атомных ядер и образованию ядер более тяжелых элементов. Энергия, необходимая для преодоления кулоновского барьера при сближении ядер, черпается из кинетической энергии их хаотического теплового движения. В результате выделяется ядерная энергия связи, часть которой переходит в тепло, например в форме быстрых нейтронов и γ-квантов. Другую часть уносят нейтрино.

Термоядерный синтез — основной источник энергии излучения звезд. Бо́льшую часть своей активной жизни звезда получает энергию в результате реакций превращения ядер водорода (протонов) в ядра гелия. Эти реакции происходят во внутренней области (ядре) звезды, где температура газа превышает 10 млн К. Огромные запасы внутриядерной энергии постепенно освобождаются в недрах звезды, обеспечивая ее длительное существование в виде почти не меняющегося со временем (стационарного) гидростатически равновесного тела. В звездах типа Солнца этот процесс может продолжаться более 10 млрд лет. После «выгорания» водорода температура в ядре звезды повышается до 100 млн К, и там начинается реакция превращения гелия в углерод. В процессе эволюции звезд, значительно более массивных, чем Солнце, цепочка ядерных реакций продолжается и после выгорания гелия, приводя к образованию в недрах звезды всё более тяжелых (по атомной массе) элементов вплоть до образования ядер Fe и Ni, которые имеют наибольшую энергию связи в расче-

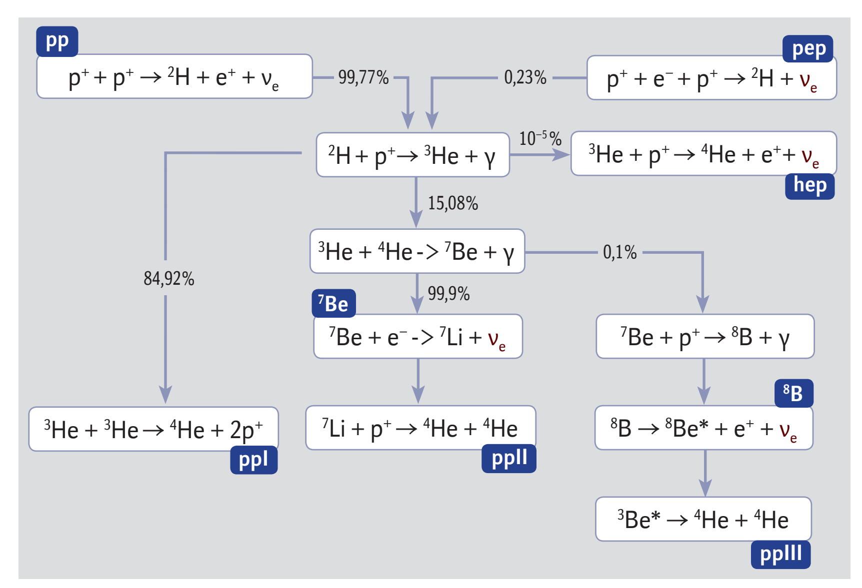



**CNO-цикл термоядерного** синтеза гелия из водорода.

те на один нуклон. Появление на определенных стадиях эволюции звезд свободных нейтронов и захват их ядрами элементов группы железа приводит к синтезу еще более тяжелых ядер, вплоть до трансурановых элементов.

Термоядерные рекции в звездах приводят к постепенному изменению химического состава звездного вещества, что вызывает перестройку звезды и ее продвижение по эволюционному пути. Первый этап эволюции заканчивается истощением водорода в центральных областях звезды. Затем, после повышения температуры, вызванного сжатием центральных слоев звезды, лишенных источников энергии, становятся эффективными термоядерные реакции горения гелия, которые сменяются реакциями горения C, O, Si и последующих элементов – вплоть до Fe и Ni. Вследствие сильной зависимости подбарьерных термоядерных реакций от температуры на каждом очередном этапе горения температура звездного вещества остается примерно постоянной. После истощения очередного ядерного горючего происходит повышение температуры и плотности до тех пор, пока не включаются новые термоядерные реакции между ядрами – продуктами предыдущего этапа эволюции. Следовательно, каждому этапу звездной эволюции соответствуют определенные термоядерные реакции.

Первые в цепи таких термоядерных реакций – водородные. Они протекают двумя путями в зависимости от начальной температуры $T_c$ в центре звезды, которая связана с ее массой $M$ в момент достижения главной последовательности. При $T_c < 17$ млн К ($M \lesssim 1{,}2\ M_\odot$) основной оказывается




**Все каналы термоядерной реакции синтеза гелия из водорода в рамках pp-цепочки с указанной в процентах вероятностью каждого из них в точках разветвления.**

pp-цепочка реакций синтеза гелия из водорода, при более высоких температурах преобладают реакции углеродного цикла. Главная, т. е. наиболее медленная, реакция pp-цепочки — первичная реакция, в которой участвуют два протона:

$$^1H + {}^1H \to {}^2D + e^+ + \nu,$$

в ней происходит позитронный распад одного из протонов в момент сближения двух протонов на расстояние действия ядерных сил. Затем следуют реакции

$$^2D + {}^1H \to {}^3He + \gamma;$$

$$^3He + {}^3He \to {}^4He + 2\,{}^1H.$$

Синтез гелия из водорода в реакциях углеродного цикла протекает при участии катализаторов, роль которых играют малые примеси изотопов C, N и O в первоначальном звездном веществе. Общий результат водородного или углеродного цикла можно записать в виде

$$4\,{}^1H \to {}^4He + 2\nu + 26{,}73 \text{ МэВ } (6{,}4\cdot10^{14} \text{ Дж/кг}).$$

Часть освобождающейся в этой реакции энергии уносят нейтрино: ≈0,6 МэВ в pp-цепочке и ≈1,7 МэВ в углеродном цикле на один образовавшийся атом гелия. Остальная энергия постепенно просачивается к поверхности звезды и поддерживает ее свечение многие миллионы и миллиарды лет.

О б о з н а ч е н и я: $p$ — параллакс в угловых секундах; $r$ — расстояние; $M_V$ — абсолютная звездная величина в фильтре V; $L_V/L_\odot$ — светимость ($L_V$) в фильтре V в единицах светимости Солнца ($L_\odot$).

| Имя звезды и ее обозначение в созвездии | | Блеск в фильтре V в звездных величинах* | Спектральный класс с классом светимости** | $p$ | $r$, пк | $M_V$ | $L_V/L_\odot$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Солнце | — | $-26{,}74^m$ | G2V | — | — | +4,8 | 1 |
| Сириус | α CMa | −1,47 | A1Vm | 0,379″ | 2,6 | +1,5 | 21 |
| Канопус | α Car | −0,72 | F0II | 0,010 | 100 | −5,7 | 16 000 |
| Толиман | α Cen | −0,29 | G2V+K1V | 0,742 | 1,3 | +4,1 | 1,9 |
| Арктур | α Boo | −0,04 | K1.5IIIp | 0,089 | 11,2 | −0,3 | 110 |
| Вега | α Lyr | +0,03 v? | A0Va | 0,129 | 7,8 | +0,6 | 50 |
| Капелла | α Aur | +0,08 | G5III+G0III | 0,077 | 13,0 | −0,5 | 134 |
| Ригель | β Ori | +0,12 v? | B8Ia | 0,004 | 250 | −6,8 | 45 000 |
| Процион | α CMi | +0,34 | F5IV–V | 0,286 | 3,5 | +2,7 | 7,3 |
| Ахернар | α Eri | +0,50 | B3Vpe | 0,023 | 43,5 | −2,7 | 1 000 |
| Бетельгейзе | α Ori | +0,58 v | M2Iab | 0,008 | 125 | −5,0 | 8 400 |
| Хадар | β Cen | +0,61 v? | B1III | 0,006 | 170 | −5,5 | 14 000 |
| Акрукс | α Cru | +0,76 | B0.5IV+B1V | 0,010 | 100 | −4,2 | 4 200 |
| Альтаир | α Aql | +0,77 | A7V | 0,194 | 5,2 | +2,2 | 11 |
| Альдебаран | α Tau | +0,85 v | K5III | 0,050 | 20 | −0,7 | 160 |
| Антарес | α Sco | +0,91 v | M1.5Iab+B4Ve | 0,005 | 200 | −5,5 | 4 000 |
| Спика | α Vir | +0,96 v | B1III–IV+B2V | 0,012 | 83 | −3,6 | 2 400 |
| Поллукс | β Gem | +1,14 | K0IIIb | 0,097 | 10,3 | +1,1 | 31 |
| Фомальгаут | α PsA | +1,16 | A3V | 0,130 | 7,7 | +1,7 | 17 |
| Мимоза | β Cru | +1,25 v? | B0.5III | 0,009 | 110 | −4,0 | 3 200 |
| Денеб | α Cyg | +1,25 v? | A2Ia | 0,001 | 1000 | −8,8 | 270 000 |

* После числа отмечена значительная переменность блеска (v) или его слабая переменность (v?).
** У двойных звезд с компонентами сравнимой светимости в спектре видны две системы линий.

# Рекомендуемая литература


Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б. М. Шустова, Л. В. Рыхловой. М.: Физматлит, 2010.

Астрономия: век XXI / под ред. В. Г. Сурдина. Фрязино: Век 2, 2015.

Галактики / под ред. В. Г. Сурдина. М.: Физматлит, 2017.

Жаров В. Е. Сферическая астрономия. Фрязино: Век 2, 2006.

Звезды / под ред. В. Г. Сурдина. М.: Физматлит, 2013.

Кинг А. Р. Введение в классическую звездную динамику. М.: УРСС, 2002.

Ковалевский Ж. Современная астрометрия. Фрязино: Век 2, 2004.

Кононович Э. В., Мороз В. И. Общий курс астрономии, М.: УРСС, 2011.

Ксанфомалити Л. В. Парад планет. М.: Наука. Физматлит, 1997.

Небо и телескоп / под ред. В. Г. Сурдина. М.: Физматлит, 2017.

Солнечная система / под ред. В. Г. Сурдина. М.: Физматлит, 2017.

Сильченко О. К. Происхождение и эволюция галактик / под ред. В. Г. Сурдина. Фрязино: Век 2, 2017.

Система Сатурна глазами «Кассини» (The Saturn System Through the Eyes of Cassini. NASA, 2017). Электронная книга в свободном доступе: https://saturn.jpl.nasa.gov/resources/7777.

Сурдин В. Г. Астрономические олимпиады. М.: МГУ, 1995.

Сурдин В. Г. Астрономические задачи с решениями. М.: УРСС, 2002.

Сурдин В. Г. Вселенная от А до Я. М.: Эксмо, 2012.

Сурдин В. Г. Разведка далеких планет. М.: Физматлит, 2014.

Сурдин В. Г. Вселенная в вопросах и ответах. Задачи и тесты по астрономии и космонавтике. М.: Альпина нон-фикшн, 2017.

Шубин П. С. Венера. Неукротимая планета. Кемерово: издатель П. С. Шубин, 2015.

Язев С. А. Лекции о Солнечной системе. СПб.: Лань, 2011.

# Указатели*

## Именной указатель



## Предметный указатель



* Цветом отмечены ссылки на раздел «Краткий справочник».

# Оглавление

*Научно-популярное издание*

**Сурдин Владимир Георгиевич**
Астрономия. Популярные лекции

Подписано в печать 24.09.2018. Формат 90×60/16. Усл. печ. л. 22. Тираж 3000 экз.
Отпечатано в ООО «ИПК ПАРЕТО-ПРИНТ»,
170546, Тверская обл., Калининский р-н, Бурашевское сельское поселение,
промышленная зона Боровлево-1, комплекс № 3 «А»
Тел: (4822) 62-00-17, факс: (4822) 62-00-18, www.pareto-print.ru

---

Издательство Московского центра
непрерывного математического образования
119002, Москва, Большой Власьевский пер., д. 11 ☎ (499) 241-08-04

Книги издательства можно приобрести в магазине «Математическая книга»
☎ (495) 745-80-31, e-mail: biblio@mccme.ru